

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

# **Elektroerozivní hloubení**

Electroerosion Excavation

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Tomáš Filip  
doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2010

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 18.5. 2010 .....

..... Tomáš Filip .....

Tomáš Filip



Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ..... 18.5. 2010 .....

..... Tomáš Filip .....

Tomáš Filip

Adresa trvalého pobytu diplomanta: **Tomáš Filip**

**Na Výsluní 198**

**563 01 Lanškroun**



## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

FILIP, T. *Elektroerozivní hloubení.: bakalářská práce.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 62 s. Vedoucí práce: Vladimír Vrba

Bakalářská práce zkoumá vlastnosti, dvou tvarově stejných, nástrojových elektrod určených pro elektroerozivní obrábění - hloubení. Nástrojové elektrody budou vyrobeny z grafitu. Obě porovnávané elektrody jsou vyrobeny z grafitového materiálu od různých výrobců. Použité grafitové materiály mají podobné vlastnosti. Obrábění nástrojovými elektrodami bude prováděno na stroji Agie Agietron Impact 3. Vhodným nastavením technologických parametrů elektroerozivního obráběcího stroje provedeme obrobení plochy pomocí obou nástrojových elektrod. Po obrobení vyhodnotíme vliv hloubení na nástrojovou elektrodu a na obráběný povrch. Obě elektrody porovnáme získanými vlastnostmi, které jsme dosáhli při obrábění. Na závěr vyhodnotíme vzájemnou zaměnitelnost obou grafitových materiálů vhodných pro elektroerozivní hloubení.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

FILIP, T. *Electroerosion Excavation : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Machining and Fabrication Institute, 2010, 62 p. Thesis head: Vrba, V.

Bachelor thesis examines characteristics of two identically shaped tool electrodes used for electroerosion machining – excavation. The tool electrodes are made from graphite. Both electrodes under the comparison are made from graphite material differing by manufacturer. Used graphite materials have similar qualities. The tool electrode machining is being conducted on Agie Agietron Impact 3 machine. We are conducting machining through the use of both tool electrodes with appropriate settings of electroerosion machining machine's technological parameters. The influence of excavation on the tool electrode and on the machined surface is evaluated after the machining. We are comparing both electrodes and qualities they gained after the machining. We evaluate their mutual exchangeability in the end of the thesis.

## Obsah bakalářské práce

	strana
<b>Seznam použitých značek a symbolů.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Úvod.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Obecná charakteristika problému.....</b>	<b>9</b>
2.1. Historie a údaje společnosti.....	9
<b>3. Nekonenční metody obrábění.....</b>	<b>11</b>
3.1. Základní metody nekonvenčního obrábění.....	14
3.1.1. Elektroerozivní obrábění - hloubení.....	14
3.1.2. Elektroerozivní obrábění - řezání drátovou elektrodou.....	17
3.1.3. Elektrochemické obrábění.....	19
3.1.4. Chemické obrábění.....	21
3.1.5. Obrábění paprskem fotonů - laserem.....	22
3.1.6. Obrábění plazmou.....	24
3.1.7. Obrábění ultrazvukem.....	27
3.1.8. Obrábění kapalinovým paprskem a proudem brusiva.....	29
3.2. Grafit.....	32
3.2.1. Vzhled a stavba grafitu.....	32
3.2.2. Vlastnosti grafitu.....	33
3.2.3. Vznik, výskyt a využití grafitu.....	34
3.2.4. Obrobitelnost grafitu.....	35
<b>4. Návrh metodiky experimentů.....</b>	<b>37</b>
4.1. Návrh tvaru nástrojové elektrody.....	38
4.2. Materiál nástroje.....	39
4.3. Materiál obrobku.....	39
4.4. Obráběcí stroj.....	41
<b>5. Diskuze experimentů.....</b>	<b>42</b>
5.1. Varianta experimentu A - nastavení EDM stroje dle softwaru stroje.....	42
5.2. Varianta experimentu B - nastavení EDM stroje dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc. ....	46
<b>6. Technicko ekonomické zhodnocení.....</b>	<b>50</b>
<b>7. Závěr.....</b>	<b>53</b>
<b>8. Seznam použité literatury.....</b>	<b>54</b>
<b>9. Seznam příloh.....</b>	<b>56</b>

## **Seznam použitých značek a symbolů**

EDM	Electric Discharge Machining - obrábění elektrickým výbojem.
VDI	Zkratka pro číselné označení drsnosti povrchu využívající obráběcí stroj AGIE CHARMILLES ( tabulka pro přepočet drsnosti povrchu VDI na střední aritmetickou úchylku Ra viz. <b>Příloha H - Drsnost VDI</b> ) [-].
OFF - TIME	Doba mezi jednotlivými impulzy, při které dochází k výplachu odebraného materiálu [ $\mu$ s].
ON - TIME	Doba impulsu, při kterém dochází k úběru materiálu [ $\mu$ s].
T	ON - TIME [ $\mu$ s].
P	OFF - TIME [ $\mu$ s].

## **1 Úvod**

Strojírenská výroba patří k nejvýznamnějším odvětvím českého zpracovatelského průmyslu. Bezesporu je jedno z nejdůležitějších odvětví české ekonomiky. Pro národní hospodářství má klíčový význam jak pro tvorbu HDP, zahraničně obchodní bilanci i pro vytváření pracovních míst a celkovou zaměstnanost. Na strojírenskou výrobu jsou navázány výzkumné, vývojové a vzdělávací instituce, jakož i řada dalších služeb. Strojírenské výrobky mají velmi široké uplatnění a jsou tudíž indikátorem našeho hospodářství.

Pro budoucnost našeho strojírenství je proto nutné využívat stále progresivnějších metod zpracování materiálů. Pro nově vzniklý strojírenský produkt, uspokojující vysoké nároky spotřebitele, je především důležité vhodné zvolení jednotlivých komponentů s novým a výhodnějším konstrukčním provedením. Také je zapotřebí správné volby technologie výroby s cílem dosáhnout výrobku, který by měl dokonalejší vlastnosti, požadovanou přesnost rozměru a drsnost povrchu, provozní spolehlivost na vysoké úrovni, vyšší účinnost, hospodárnost, provozní bezpečnost a optimálními náklady na údržbu s dlouho životností. Je tedy zapotřebí používat nejmodernějších trendů trhu jako je např. HSC obrábění - obrábět vysokými řeznými rychlostmi, automatizace a robotizace výroby, které určují směr budoucího vývoje – vyrábět ve velmi krátkém čase pomocí moderních procesů. Mezi nejmodernější technologie zpracování materiálu patří v progresivním strojírenství i nekonvenční metody obrábění. Nekonvenční metody obrábění se opodstatněně používají tam, kde z hlediska technického nebo ekonomického nelze použít obrábění klasickými řeznými nástroji. Cílové vlastnosti výrobku nám neovlivňuje jen správně zvolená konstrukce a technologie výroby, ale i vhodně zvolený nástroj a nástrojový materiál pro obrábění. V dnešní době se jako materiály pro řezné nástroje využívá: povlakovaných i nepovlakovaných slinutých karbidů, cermetů, řezné keramiky, supertvrdých řezných materiálů jako je diamant a kubický nitrid boru. Pro nekonvenční metody obrábění s využitím nástrojových elektrod se jako materiálu na výrobu elektrod používá měď a především grafit různých vlastností. Pomocí výzkumu a experimentů je tedy stále nutné, dosahovat pokrokovějších poznatků o strojírenské konstrukci a technologii výroby. Rozvoj těchto oborů je spojen se vznikem technologických center úzce spojujících výzkum a následnou výrobu špičkových technologií. Výsadní postavení pro uplatnění moderních technologií má na mezinárodní trhu automobilový průmysl, ve kterém se využívá nejvíce moderních metod zpracování materiálu. Neméně podstatná je i výroba dalších dopravních prostředků, zejména letecké a raketové techniky. Významné postavení si udržuje výroba obráběcích strojů a spotřebního zboží.

Proto každá strojírenská firma, která chce být úspěšná na dnešních a především budoucích náročných trzích, musí sledovat a především se snažit využívat nové trendy trhu. V neposlední řadě nám musí nové technologie ve strojírenství posloužit ke zvýšení hospodárnosti výroby, jak na straně úspory výrobních časů, tak na straně snížení nákladů na zhotovení výrobku. Ceny nových výrobků musí být přijatelné pro světový trh, jehož globální funkce se ještě rozšíří a konkurence mezi producenty naroste. Konkurenceschopné strojírenství je nejvyšším zájmem tuzemských i zahraničních investorů a podpora výzkumu a vývoje je tak rozhodující pro udržení a zvyšování jeho úrovně s efektem dlouhodobé stabilizace investic do tohoto odvětví.



## **2 Obecná charakteristika problému**

Bakalářská práce je zpracována pro firmu Forez s.r.o. Hlavním úkolem je ověření zaměnitelnosti dvou tvarově stejných grafitových elektrod pro elektroerozivní hloubení. Nástrojové elektrody jsou vyrobeny z grafitového materiálu podobných vlastností od různých výrobců. Dodavatel grafitového materiálu pro firmu Forez s.r.o. však tvrdí, že oba materiály jsou vlastnostmi téměř shodné a při obrábění dosahují stejných výsledků. Tudíž by měli být při výrobním procesu zaměnitelné a nemělo by docházet ke změně produktivity práce. Zabýváme se pouze hrubovací částí hloubení, při kterém dochází k největšímu úběru materiálu. Elektroda je však také vystavena největšímu opotřebení. Daný vzorek materiálu je oběma druhy grafitových nástrojových elektrod obroben, při stejné nastavených technologických podmínkách obráběcího stroje. Na první pohled vypadají všechny grafitové materiály podobně, elektrody z nich vyrobené se však velmi liší. Použití správně zvoleného grafitu je v dnešní době velmi důležité. Např. u hloubení vstřikovacích forem, na které se používají rozsáhlé sady nástrojových elektrod, může dojít při vhodné volbě grafitovém materiálu na obráběcí nástroj k úspoře až stovek hodin z celkového výrobního času formy. Ověření vlastností grafitového materiálu je snadné. Vyžaduje jen znalost práce s obráběcím strojem a údaje o grafitu pro optimální nastavení parametrů EDM. I když se jedná o základní teorii EDM procesu a obecnou závislost několika veličin, ne každý dodavatel grafitu je může poskytnout. Cílem bakalářské práce je přesvědčit firmu Forez s.r.o. o nezaměnitelnosti obou grafitových materiálu pro hrubovací operace při elektroerozivním obrábění. Dále určíme vhodnější grafitový materiál pro hrubovací EDM proces.

### **2.1 Historie a údaje společnosti**

Společnost FOREZ s.r.o. byla založena v roce 1996. Dnes je se svými 192 zaměstnanci nástrojárnou střední velikosti, počtem konstrukčních kapacit však konkuruje největším nástrojárnám v České republice. Firma získala certifikát řízení jakosti ČSN EN ISO 9001:2001, a tím i možnost uspokojit nejnáročnější zákazníky. [4]

Společnost se stala propagátorem nových trendů v oblasti obrábění. Je velmi dobře technologicky vybavena (mj. několik špičkových CNC a HSC CNC frézek, nejmodernější elektroerozivní drátové řezačky AGIE CUT nebo elektroerozivní hloubící stroje AGIE). Všechny výše uvedené CNC stroje jsou plně vytíženy a pracují nepřetržitě 24 hodin 7 dní v týdnu, což zaručuje pružnou reakci na zákaznickovy požadavky. Právě velmi dobré

technologické vybavení firmy, spolu se schopností dodávat kvalitní formy a nástroje pro technicky náročné výlisky firmám jako Robert Bosch, Witte, Schneider Electric, Visteon, Valeo a další, je hlavním důvodem pokračujícího růstu. Mezi hlavní výrobky této firmy patří vstřikovací formy různé složitosti, kterých se zde ročně vyrobí 100 - 150 kusů. Dále se firma zaměřuje na výrobu nástrojů, jako nástroje postupové pro vysoce sériovou výrobu, samostatné nástroje pro tvarové (prostorové) výlisky a tažné nástroje. Ročně dokáže firma vyrobit okolo 40 nástrojů vlastní konstrukce. V neposlední řadě se FOREZ s.r.o. zaměřuje na výrobu kovových a plastových výlisků. Zajišťuje výlisky produkované na moderních lisech. Firmě se daří držet meziroční růst obrátu v rozmezí 20 - 40 %.

[4]

Záměrem firmy je pokrýt v budoucnu co největší část výrobního cyklu subdodavatelů pro automobilový a elektrotechnický průmysl. Nejen formu či nástroj nakreslit a vyrobit, ale i lisovat kovové a plastové výlisky a přiblížit se co nejvíce v oblasti tvorby konstrukčních modelů prvotní tvorbě designéra tak, abychom mohli nabízet ucelený servis od návrhu až k dodávce montážních celků.

[4]

Kontakt:

**FOREZ s.r.o.**

Ostrov u Lanškrouna 2  
PSČ 561 22

tel.: 465 352 111

fax: 465 352 222

e-mail: [forez@forez.cz](mailto:forez@forez.cz)



Obr. 2.1. Logo firmy FOREZ s.r.o. [4]

### **3 Nekonvenční metody obrábění**

Nekonvenční metody obrábění, neboli fyzikální technologie obrábění, jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o bezsilové působení na obráběný materiál, bez vzniku klasických třísek, které známe z obrábění řeznými nástroji. [2]

Podle principu úběru materiálu se fyzikální technologie obrábění dělí do následujících skupin: [2]

- obrábění elektrickým výbojem - elektroerozivní obrábění elektrickou jiskrou a elektrickým obloukem,
- obrábění chemické - elektrochemické a chemické obrábění
- obrábění paprskem koncentrované energie - obrábění laserem, plazmou, elektronovým a iontovým paprskem
- mechanické procesy obrábění - obrábění ultrazvukem, kapalinovým paprskem a proudem brusiva.

U prvních tří skupin je obrobiteľnosť materiálu dána jeho: [1]

- tepelnou vodivostí,
- teplotou tání,
- elektrickou vodivostí,
- odolností proti elektrické erozi,
- odolností proti chemické erozi,
- vzájemnou vazbou atomů a molekul.

U těchto metod obrábění nezávisí obrobiteľnosť materiálu na jeho mechanických vlastnostech (tj. na pevnosti, tvrdosti apod.), jako je tomu u klasického třískového obrábění a u čtvrté skupiny, tj. u uvedených mechanických procesů obrábění. Obecně je použití fyzikálních technologií opodstatněné tam, kde z hlediska technického nebo ekonomického nelze použít obrábění klasickými řeznými nástroji. [1]

Důvody stále širšího zavádění fyzikálních technologií do průmyslu jsou:

[1]

- rostoucí podíl těžkoobrobitelných materiálů v konstrukci strojů (tj. žárovevných a žárovzdorných ocelí, kalených ocelí a litin, keramických materiálů, slinutých kovů, titanových slitin, kompozitních materiálů atd.),
- možnost komplexního opracování i značně nepravidelných tvarů (vnějších i vnitřních),
- zvyšující se nároky na tvarovou složitost a rozměrovou přesnost součástí, zejména nástrojů, forem a zápusťek,
- miniaturizace, tj. výroba přesných miniaturních součástí používaných zejména pro výrobu vyšetřovacích sond v medicíně, v řídicí a regulační technice,
- vhodnost uplatnění v automatizovaných provozech, využití systému CAD a CAM.

Obecným nedostatkem některých fyzikálních technologií obrábění je menší produktivita.

Tab. 3.1. Porovnání výkonových parametrů vybraných metod obrábění [1]

Způsob obrábění	Úběr materiálu $Q_v$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$ )*	Měrná práce $E_p$ ( $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	Příkon obráběcího stroje (kW)	Dosažitelná přesnost (mm)
Soustružení Frézování	až 1 000 (15 000)	1 až 10	5 až 50	0,025
Broušení	5–100 (80–1 500)	5 až 200	5 až 150	0,002 5
Elektroerozivní obrábění	5 (80)	100 až 1 000	10	0,025
Plazmové obrábění	100 (1 500)	500 až 1 000	50 až 150	0,5
Obrábění elektro- novým paprskem	~0,01 (0,15)	1 500	100	0,025 5
Obrábění laserem	0,005 (0,08)	až 30 000	5 až 15	0,05
Elektrochemické obrábění	15–25 (250–400)	10 až 100	200	0,055
Ultrazvukové obrábění	~10 (200)	1 000 až 3 000	1 až 5	0,015 5

\*) V závorce jsou uvedeny hodnoty měrného objemového úběru ( $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )



Srovnání dosahovaných úběrů materiálů  $Q_v$  je v **tab. 3.1.**, kde jsou uvedené též hodnoty měrné práce  $E_p$ , vynaložené na obrobení jednotkového objemu, charakterizující energetickou náročnost jednotlivých metod, příkonu obráběcího stroje a přesnosti obrábění. Pro srovnání uveďme, že energie potřebná k roztavení oceli (z okolní teploty) činí asi  $10 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ .

Pro představu o využití fyzikálních technologií obrábění v oblasti miniaturizace součástí jsou v **tab. 3.2.** srovnány metody z hlediska možnosti vyvrtání díry o nejmenším průměru. [1]

Tab. 3.2. Porovnání metod z hlediska minimálního průměru vyvrtané díry [1]

Metoda obrábění	Elektro-chemické obrábění	Obrábění elektronovým paprskem	Obrábění laserem	Elektro-erozivní obrábění
Nástroj	Skleněná kapilára s vloženým zlatým nebo platinovým drátem	Elektronový paprsek	Paprsek laseru	Měď, slitiny Cu, wolfram
Pracovní médium	Elektrolyt, $\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\text{HNO}_3$ , $\text{HCl}$	Vakuum	Vzduch, $\text{CO}_2$ , argon	Dielektrikum
Posuv (mm) Čas vrtání (s)	1 až 4	$10^{-5}$ až 20	$10^{-3}$ až 20	0,25
Nejmenší průměr vrtané díry (mm)	0,2	0,015	0,025	0,03
Maximální poměr délky ku průměru díry	100	až 100	15	20
Tolerance průměru (mm)	$\pm 0,03$	+0,02	+0,02	$\pm 0,01$

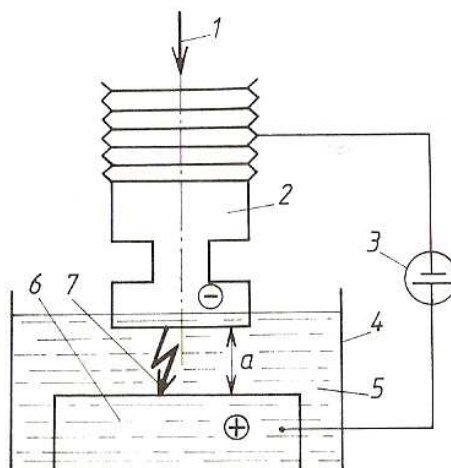
### 3.1 Základní metody nekonvenčního obrábění

#### 3.1.1. Elektroerozivní obrábění – hloubení

Elektroerozivní obrábění je elektrotepelný proces, u kterého se dosahuje úběru materiálu elektrickými výboji mezi katodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a anodou (nejčastěji ji tvoří obrobek) ponořenými do tekutého dielektrika (**obr. 3.1.**), což je většinou kapalina s vysokým elektrickým odporem. Základem úběru materiálu je elektroeroze. Vlivem vysoké koncentrace energie ( $10^5$  až  $10^7$  W.mm<sup>-2</sup>) materiál taje a odpařuje se. Uvedený jev lze využít k elektrojiskrovému hloubení, děrování a řezání. [1]

Obrábění probíhá na dvou elektrodách oddělených jiskrovou mezerou velikosti 0,01 až 0,5 mm. Tvar nástroje je negativem obráběné plochy. Je vyrobený z materiálu odolného vůči erozi, nejčastěji měď, mosaz i grafit, jejichž úbytek v porovnání z ocelí činí jen 5 - 15 %. Nástrojová katoda vykonává vertikální pohyb a současně vibruje. Připojením obou elektrod na zdroj nastává mezi nimi elektrický výboj ve formě jisker. Jejich tepelnou a tlakovou energií se materiál obrobku v místě napadení zahřívá na tavicí teplotu a je vystřelen do mezery mezi elektrody. Každá jiskra zanechá na obráběném povrchu „kráter“. Samotný princip lze jednoduše popsat tak, že při vzájemném přiblížení se obrobku a nástroje - elektrody, na niž je přivedeno elektrické napětí - dochází k elektrickému výboji, čímž dochází k roztavení mikroskopických částeczek materiálu obrobku a díky jejich následnému vyplavení a odstranění z prostoru obrábění dochází k dělení nebo opracování obrobku do požadovaného tvaru či rozměru. Přesnost obrábění závisí na boční mezeře, která není stejná a způsobuje kuželovitost otvorů. Jako dielektrické kapaliny se používá petroleje, nebo transformátorového oleje. [3]

Je nutné zdůraznit, že elektroerozivním obráběním lze opracovávat pouze elektricky vodivé materiály!



Obr. 3.1. Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [1]

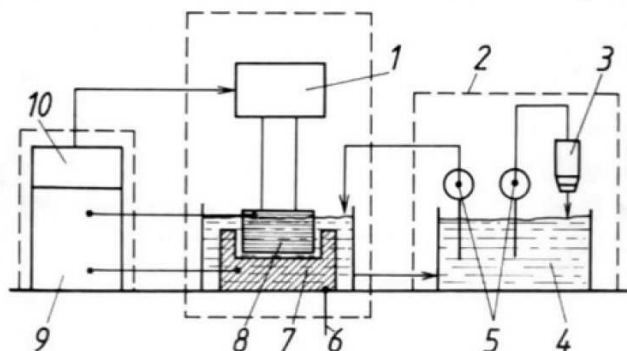
1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor,  
4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj

### Zákonitosti elektroeroze:

[1]

- podléhají jí všechny elektricky vodivé materiály,
- může probíhat v plynném i kapalném prostředí (dielektriku),
- vhodným zapojením a volbou pracovních parametrů elektrického obvodu lze dosáhnout dvou druhů výbojů:
  - oblouk, tj. stacionární výboj
  - jiskra, tj. nestacionární výboj,
- výboje probíhají mezi elektrodami ve vzdálenosti 5 až 100  $\mu\text{m}$ .

Moderní stroje mají všechny činnosti řízeny CNC řídicím systémem. Konkrétně se jedná o řízení směru a rychlosti pohybů, polohy pracovního stolu, pracovních parametrů generátoru, přívodu dielektrika, automatické výměny elektrod v zásobníku (**obr. 3.2.**), řízení posuvu elektrody a kontrolu probíhající elektroeroze. Řídicí systémy umožňují snadné naprogramování stroje. Postup úběru materiálu lze simulovat na obrazovce. Elektroerozivní stroje pro hloubení dutin se vyrábějí také v provedení, které umožňuje bezobslužný provoz až po dobu 48 hodin. Jednotlivé technologické aplikace vyžadují různé formy elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu a na obrobek přiváděny z generátoru ve formě pulzů o určité frekvenci. Každý pulz je charakterizován napětím, proudem a tvarem. [2]



Obr. 3.2. Schéma elektroerozivního stroje [2]

1 – pracovní hlava, 2 – filtrační zařízení, 3 – filtr, 4 – dielektrikum, 5 – čerpadlo, 6 – pracovní stůl, 7 – obrobek, 8 – nástrojová elektroda, 9 – generátor, 10 – CNC řídicí systém

Zařízení na elektrojiskrové obrábění se vzájemně liší hlavně použitým generátorem proudu. Používají se dva základní typy generátorů: [3]

- **Kondenzátorové** - Pracují na principu nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Jsou jednoduché a levné a umožňují úběr oceli až  $1\,000\text{ mm}^3/\text{min}$
- **Impulzní** - Polovodičové, umožňují úběr  $3\,000 - 5\,000\text{ mm}^3/\text{min}$ .

Kvalita opracované plochy je dána její drsností a také její stavem, tj. složením. Technologické parametry, tj. přesnost rozměrů a jakost povrchu, dosahovaného při elektroerozivním obrábění, jsou v **tab. 3.3**. Dosahovaný úběr materiálu obrobku činí  $5\text{ až }10\text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . [1]

Tab. 3.3. Parametry obrábění dosahované elektroerozivním obráběním [1]

Způsob obrábění	Dosažitelná přesnost rozměrů (mm)	Dosažitelná jakost obrobce- ného povrchu $R_a$ , $R_{\max}$ ( $\mu\text{m}$ )
Opracování nahrubo pulzní zdroje velká energie výboje (hloubení)	$\pm 0,02$ až $\pm 0,5$	$R_a > 6$ $R_{\max} \sim 25$
Normální opracování pulzní zdroje	$\pm 0,01$ až $\pm 0,02$	$R_a = 2$ až $6$ $R_{\max} = 8$ až $25$
Jemné a velmi přesné obrábění, vysokofrekvenční zdroje řezání drátovou elektrodou	$\pm 0,005$ až $\pm 0,01$	$R_a = 0,8$ až $2$ $R_{\max} < 6$
Elektroerozivní leštění (přesné řezání drátovou elektrodou)	až $\pm 0,002$	$R_a = 0,2$ až $0,8$ $R_{\max} < 2,5$ až $4$



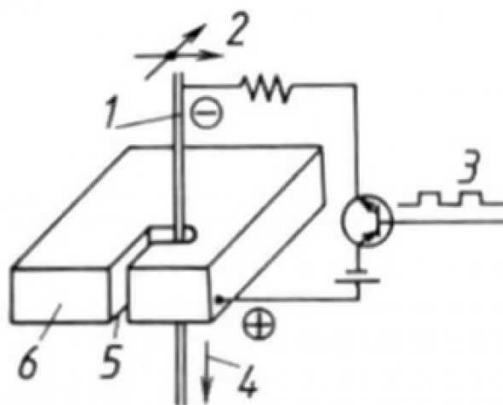
Elektrojiskrové obrábění se používá v nástrojárnách k výrobě dutin zápustek, průstřížnic, průvlaků, výrobu složitých tvarových povrchů, výroba mikrootvorů, leštění povrchů.

### 3.1.2. Elektroerozivní obrábění - řezání drátovou elektrodou

Platí zde stejné fyzikální zákonitosti elektrické eroze jako u hloubení. Metoda umožňuje vyrábět tvarové přímkové plochy, tzn. tvořící čarou těchto ploch je přímka.

Stroj pro elektroerozivní řezání drátovou elektrodou sestává z těchto hlavních skupin: CNC řídicí systém, generátor pulzů, systém dodávání a filtrace dielektrika, systém podávání a vedení drátové elektrody, drátová elektroda a upínač obrobků. Některé skupiny jsou shodné se stroji pro hloubení dutin a zápustek. Rozdíl je v nástrojových elektrodách a v systému podávání a vedení drátové elektrody. Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou ukazuje (obr. 3.3.).

[1]



Obr. 3.3. Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou [1]

1 – drátová elektroda, 2 – CNC řídicí systém, 3 – generátor, 4 – směr posuvu elektrody,  
5 – vyřezaná drážka, 6 – obrobek

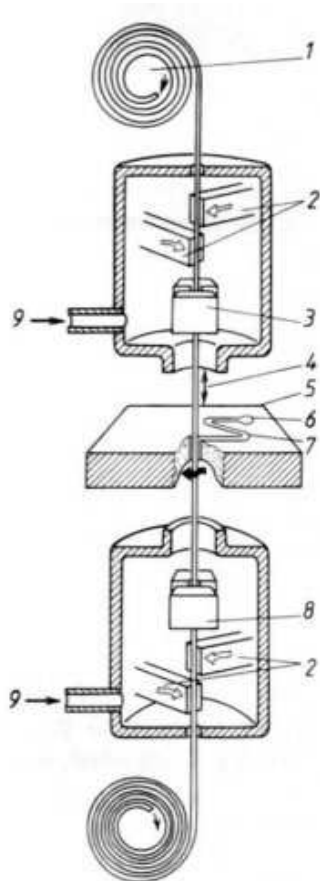
Nástrojová elektroda je tvořena tenkým drátem, který se pomocí speciálního zařízení odvíjí, aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebení. Drát je většinou měděný, na větší průměry se používá mosazný a na velmi jemné řezy se používá molybdenový drát o průměru 0,03 až 0,07 mm. Mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem vznikají elektrické výboje. Pracovní mezera mezi obrobkem a elektrodou se vytváří samočinně úběrem materiálu a obrobku před elektrodou. Nástrojová elektroda tvořená drátem je nástroj, který může odebírat materiál v každém směru, což umožňuje ve spojení se šesti osami souřadnic řízenými CNC řídicím systémem obrábět přesně i velmi složité tvary. Způsob zapojení nástrojové elektrody a obrobku do elektrického obvodu je dán polaritou a typem výbojů. U moderních strojů

s tranzistorovými generátory pulzů se používá tzv. přímá polarita, tj. nástrojová elektroda jako katoda a obrobek jako anoda. [1]

Drátová elektroda musí mít kromě vysoké elektrické vodivosti zejména: [1]

- dostatečnou mechanickou pevnost,
- vysokou přesnost průměru drátu, tj. úzké tolerance průměru,
- vysokou tvarovou přesnost (kruhovitost).

Přesnost vyřezaných tvarů je dána vlastnostmi stroje, přesností a spolehlivostí CNC řídicího systému, stabilitou nastavených pracovních parametrů generátoru a kvalitou přívodu a čištění dielektrika. Je důležité, aby nástrojová elektroda vstupovala do místa řezání dokonale napnutá a vyrovnaná. Proto je drát před vstupem do stroje kalibrován na požadovaný průměr diamantovým průvlakem, veden napínán, což zajišťuje systém podávání a vedení nástrojové elektrody (**obr. 3.4.**). Tento systém umožňuje naklopení nástrojové elektrody vzhledem ke kolmé ose v rozsahu  $\pm 30^\circ$ . [1]



Obr. 3.4. Schéma podávání a vedení drátové elektrody [1]

1 – zásobník drátu, 2 – přívod výbojového proudu, 3 – horní vedení drátu, 4 – napínání drátu, 5 – obrobek, 6 - startovací díra, 7 – řezaný tvar, 8 – dolní vedení drátu, 9 – přívod dielektrika

Dosahované technologické parametry při elektroerozivním řezáním drátovou elektrodou: [1]

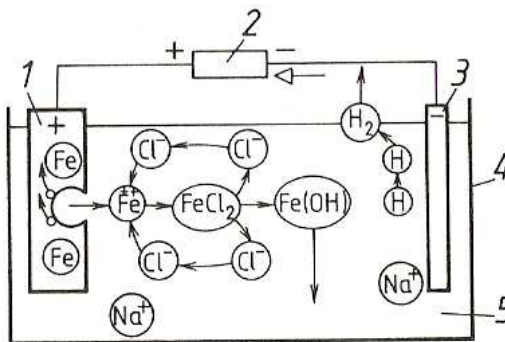
- maximální úběr materiálu  $35 \text{ až } 200 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- rovnoběžnost řezu do  $2 \text{ }\mu\text{m}$  na  $100 \text{ mm}$  tloušťky materiálu,
- jakost obrobeného povrchu  $R_a = 0,15 \text{ až } 0,3 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- přesnost rozměrů a tvaru obrobeného povrchu závisí na tepelné stabilizaci stroje:  
při kolísání teploty  $\pm 3^\circ\text{C}$  je přesnost  $\pm 3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  
při kolísání teploty  $\pm 1^\circ\text{C}$  je odchylka  $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- maximální tloušťka řezaného materiálu  $350 \text{ mm}$ .

### 3.1.3. Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění je metoda beztliskového (bezsilového) obrábění elektricky vodivých materiálů. Využívá poznatků o působení elektrického proudu na elektrolyt; podstatou metody je fyzikální jev zvaný elektrolýza. [1]

Obráběná součást - obrobek, je ponořen do elektrolytu (**obr. 3.5.**), je zapojen jako anoda a dochází na něm k reakci, při níž se kationy elektrolytu slučují s aniony kovu na povrchu anody a postupně rozrušují (ubírají) kov z anody, anoda kopíruje tvar katody (nástrojové elektrody). Z teoretických rozborů plyne, že největší rychlost rozpouštění kovu je při minimální pracovní mezeře mezi elektrodami. Tím se řídí regulace přísuvu nástrojové elektrody při obrábění – účelem je udržení stále stejné velikosti (minimální možné, asi  $0,05 \text{ až } 1 \text{ mm}$ ) pracovní mezery. V pracovní mezeře mezi nástrojem a obrobkem je hustota proudu až  $1\,000 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , při pracovním napětí stejnosměrného proudu  $5 \text{ až } 30 \text{ V}$ . [1]

Hlavní zákonitosti elektrochemického obrábění jsou dány Faradayovými zákony, teorií elektrolytů a termodynamikou galvanických článků. [1]



Obr. 3.5. Princip elektrochemického obrábění [1]

1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda), 4 – pracovní vana, 5 – elektrolyt

Fyzikální pochod je charakterizován přenosem iontů materiálu v elektrolytu, který probíhá konvencí, difuzí, migrací. Po zapojení elektrického proudu se mezi elektrodami vytvoří homogenní elektrické pole. [1]

Podle Faradayových zákonů platí:

I. zákon: množství látky uvolněné nebo chemicky přeměněné na elektrodách je přímo úměrné množství prošlého náboje;

II. zákon: prochází-li stejný proud po stejnou dobu různými elektrolyty, je množství vyloučených látek úměrné jejich chemickým ekvivalentům. [1]

Produktivita elektrochemického obrábění závisí zejména na hustotě proudu, rychlosti proudění elektrolytu a na množství aktivních činidel v elektrolytu. Při vysoké hustotě proudu však dochází ke vzniku nežádoucí tzv. pasivační vrstvy, která naopak zpomaluje anodické rozpouštění. [1]

Materiály, které jsou elektrochemickým obráběním špatně obrobitelné, jsou šedá litina (téměř neobrobitelná), slitiny s velkým obsahem uhlíku a duraly obsahující křemík. [1]

Princip elektrochemického obrábění se používá u následujících metod: [1]

- obrábění s nuceným odstraňováním produktů vzniklých chemickými reakcemi:
  - obrábění proudícím elektrolytem
    - hloubení tvarů a dutin,
    - hloubení otvorů malých průměrů,
    - odstraňování otřepů,
    - dělení materiálů;
  - s mechanickým odstraňováním
    - broušení a lapování,
    - honování;
- povrchové obrábění bez odstraňování produktů vzniklých chemickými reakcemi:
  - leštění,
  - povrchové značení.

Elektrochemické obrábění se od pokovování nebo elektrolytické výroby kovů liší především relativním posuvem elektrod, malou vzdáleností mezi elektrodami (0,05 až 1 mm), vysokou rychlostí proudění elektrolytu, vysokou hustotou proudu (až 1 000 A·cm<sup>-2</sup>) a členitým tvarem elektrod. [1]



Tab. 3.4. Porovnání elektrochemického a elektroerozivního obrábění [1]

Ukazatel	Elektrochemické obrábění	Elektroerozivní obrábění
Úběr materiálu	$\sim 20\,000\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pro zdroje 10 000 A	max. $\sim 5\,000\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Rychlost obrábění	$0,5\text{ až }10\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	$0,01\text{ až }0,1\text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Opotřebení nástroje	bez opotřebení	závislé na zdroji a pracovních podmínkách 1 až 30 %
Přesnost	$\pm 0,01\text{ až } \pm 0,2\text{ mm}$	$\pm 0,01\text{ } (\pm 0,005)\text{ mm}$
Obráběná plocha	několik $100\text{ cm}^2$ pro zdroje 10 000 A	několik $1\,000\text{ cm}^2$
Pracovní prostředí	vysoké nároky na elektrolyt a jeho čištění, problémy s odpadem	snazší čištění dielektrické kapaliny, nezávadný odpad

### 3.1.4. Chemické obrábění

Mezi tyto technologie zahrnujeme leptání, kdy se pro řízené obrábění využívá chemických reakcí mezi materiálem obrobku a chemickou látkou (tj. nástrojem), a termické odstraňování ořepů využívající tepelného účinku chemických reakcí dvou látek, které tvoří nástroj. [1]

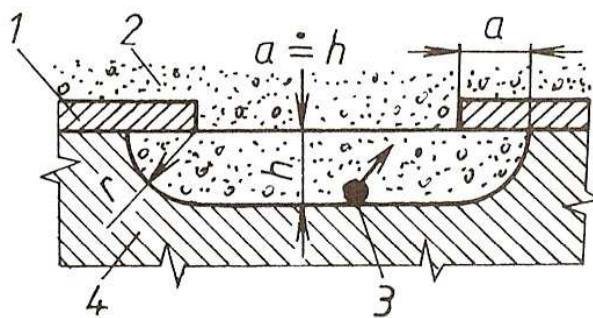
Pro potřeby miniaturizace součástí, zejména v elektronice a přesné mechanice, byly pro opracování křemíku vyvinuty speciální metody leptání, využívající fyzikální a chemické zákonitosti. Jedná se o anizotropické a selektivní leptání. [1]

#### Leptání

Chemické obrábění – leptání je řízené odleptávání vrstvy materiálu z povrchu obrobku chemickou reakcí vznikající mezi materiálem obrobku a nástrojem, tj. chemickou látkou, nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem (**obr. 3.6.**). [1]

Místa, která nemají být obrobena, je vždy nutno zakrýt speciálním lakem, tzv. maskou. Používají se speciální laky a pryskyřice nanášené v několika vrstvách, do celkové tloušťky 0,15 až 2 mm. [1]

Obráběné materiály: hliník a jeho slitiny, konstrukční uhlíkové ocele, korozivzdorné ocele, měď, mosaz a titan. [1]



Obr. 3.6. Princip chemického obrábění [1]

1 – maska, 2 – nástroj (chemická leptací látka), 3 – odebrané (odleptané) částice materiálu obrobku, 4 - obrobek

Oblast použití :

[1]

- výroba mělkých, několik setin milimetrů hlubokých, tvarově složitých reliéfů (např. do tzv. klišé pro tampoprint) apod.;
- úběr velkých ploch do malých tlouštěk a složitých tvarů (nosníky v leteckých konstrukcích, potahy křídel z hliníku apod.);
- výroba děr do tenkostěnných trubek a fólií.

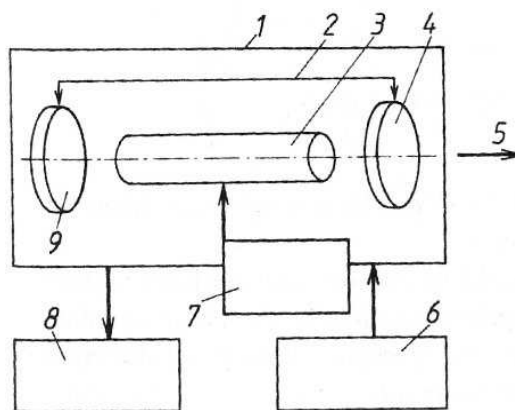
### 3.1.5. Obrábění paprskem fotonů - laserem

Obrábění a opracování materiálů laserem je založeno na přeměně světelné energie na energii tepelnou. Děje se tak při styku (interakci) paprsku laseru s materiálem obrobku, kdy se materiál obrobku vlivem vzniklé vysoké teploty ohřívá, taje a odpařuje se. Slovo Laser je složené z počátečních písmen anglického názvu popisující jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což by se dalo přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření.

[5]

Laser pracuje na principu indukované emise, tj. vynuceného záření. Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, kdy záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Další příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii do prostoru. Vzniklé záření je monochromatické (tzn. má jednu, přesně definovanou vlnovou délku) a koherentní, což znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují jedním směrem a jsou v jeho průřezu buď stejnoměrně nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny.

[5]



Obr. 3.7. Schéma zařízení pro obrábění laserem [5]

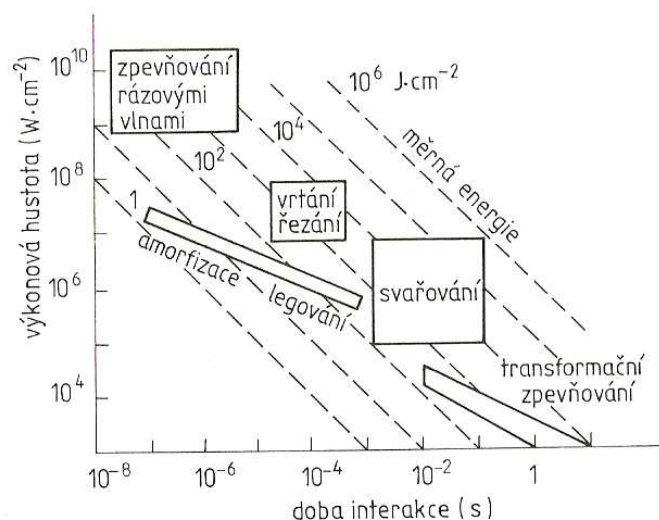
- 1 – laserová hlavice, 2 – rezonátor, 3 – laserové médium, 4 – polopropustné zrcadlo,  
 5 – výstup paprsku, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budicí zařízení, 8 – chladicí systém,  
 9 – nepropustné zrcadlo

Schopnost materiálu býti dobře nebo špatně obráběn laserem (tj. obrobiteľnosť materiálu) je dána zejména těmito vlastnostmi: [1]

- absorpcí, tj. schopností materiálu pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky, tzn. na tepelnou energii,
- tepelnou vodivostí, charakterizovanou součinitelem tepelné vodivosti,
- odrazivostí (reflexí), která je dána poměrem množství odražené energie k dopadající energii.

Obrobiteľnosť materiálu laserem je tím lepší, čím větší je absorpce materiálu, menší jeho tepelná vodivost a menší odrazivost povrchu obrobku. [1]

V diagramu na **obr. 3.8.** jsou uvedeny oblasti pracovních parametrů (hustota výstupního výkonu paprsku laseru, doba interakce a měrná energie) pro některé technologické operace.



Obr. 3.8. Oblasti pracovních parametrů laserů [1]

Dosahované parametry při řezání laserem:

[1]

- rychlost řezání závisí na převažujícím způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, tloušťce a druhu materiálu obrobku (při tloušťce materiálu  $t = 1 \text{ mm}$  je rychlost řezání  $v = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , při  $t = 10 \text{ mm}$  je  $v = 1,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ );
- kvalita řezu se hodnotí podle jakosti řezané plochy (dosahuje se  $R_a = 3,6$  až  $12 \text{ } \mu\text{m}$ ) a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti (bývá 0,05 až 0,2 mm);
- šířka řezné spáry je dána druhem laseru, materiálem a tloušťkou řezaného materiálu (bývá 0,02 až 0,2 mm)

Použití laserů v technologii:

V technologii se laser používá pro tyto operace: popisování součástí, řezání a vyřezávání, svařování a pájení, tepelné zpracování, nanášení povlaků, vrtání, soustružení, frézování a gravírování.

[1]

### 3.1.6. Obrábění plazmou

Obrábění plazmou je založeno na ohřevu nebo tavení materiálu za extrémně vysokých teplot (nad  $10\,000 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), které vznikají rozpadem molekul plynu při jejich průchodu elektrickým obloukem. Oblouk hoří mezi netavící se katodou (vyrobena z wolframu) a anodou, která může být tvořena opracovaným materiálem nebo tělesem hořáku. Z hořáku vychází vysokou rychlostí úzký paprsek plazmy o průměru řádově 1 mm. Při řezání je roztavený materiál vyfukován z místa řezu asistentním plynem.

[1]

Plazma je elektricky vodivý stav plynu, který nastává při elektrickém výboji mezi anodou a katodou – vzniká ionizovaný plyn. Původně chemicky stejnorodý plyn se změní na směs kladných a záporných iontů, fotonů a další elementární částice. [1]

Každé technologické zařízení pracující s plazmou se skládá z : [1]

- plazmového hořáku,
- zdroje elektrického proudu,
- řídící jednotky
- manipulačního zařízení, což může být souřadnicový pracovní stůl, manipulátor nebo robot.

V plazmovém hořáku, který je základní součástí, dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou energii usměrněného proudu plazmy. Důležitým parametrem plazmového hořáku je stabilizace elektrického oblouku – podle druhu použitého stabilizačního média se plazmové hořáky (**obr. 3.9.**) dělí na: [1]

- plazmové hořáky s plynovou stabilizací
  - s transferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a obráběným materiálem;
    - používá se pro opracování kovů (řezání ocelí a neželezných kovů);
  - s netransferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a výstupní tryskou, která tvoří anodu;
    - používají se pro obrábění nevodivých materiálů (např. keramiky) a k nanášení povlaků;
- plazmové hořáky s vodní stabilizací – řezací tryska má přídatné kanálky, kterými se vstřikuje voda do plazmového hořáku;
  - používají se pro řezání ocelí a neželezných kovů a pro nanášení povlaků;
  - výhodou je možnost řezat pod vodou, čímž se sníží hlučnost, prašnost a vliv UV záření na obsluhu.

U plazmových technologií se používají tyto druhy plynů: [1]

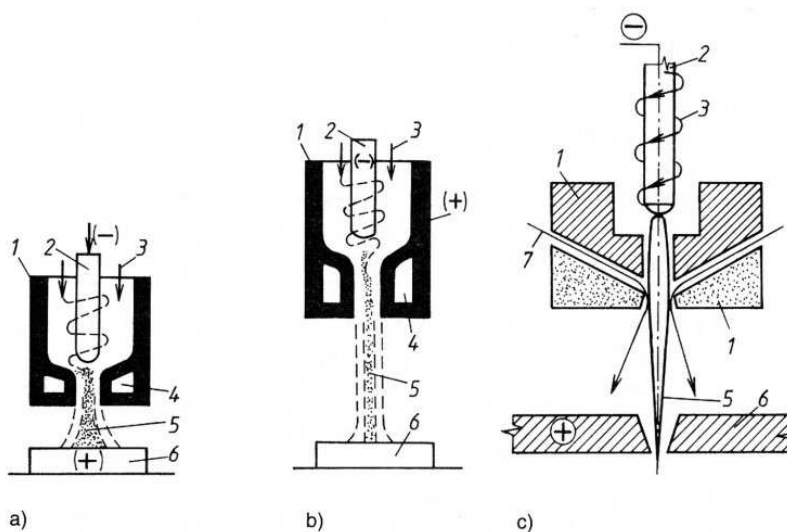
- plazmové plyny – jsou přiváděny do elektrického oblouku, kde dochází k jejich ionizaci. Používá se argon, helium, dusík, nebo směs argon + vodík;
- fokusační plyny – zaostřují (fokusují) paprsek plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku. Používá se argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popř. argonu a dusíku;

- asistentní plyny – obklopují paprsek plazmatu a pracovní místo na obrobku a chrání je před účinkem atmosféry. Používá se argon a dusík.

Volba plazmového a asistentního plynu je závislá na typu řezaného materiálu a jeho tloušťce. Kombinace obou plynů je doporučována výrobcem zařízení. Plazmový plyn se volí pro: [1]

- konstrukční ocel: kyslík, vzduch;
- vysoce legovanou ocel: argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík;
- neželezné kovy: argon/vodík, vzduch;
- kompozitní materiály: argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík. [6]

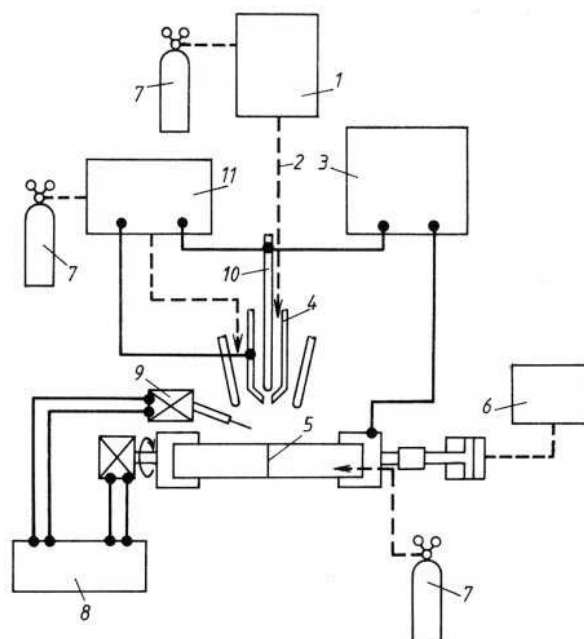
Plazmové hořáky se v technické praxi používají pro řezání, svařování, navařování a stříkání vrstev materiálů požadovaných vlastností na strojní součásti, pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, tavení materiálů v pecích, k vysokoteplotní chemické syntéze plynů a pro rozklad škodlivých průmyslových odpadů. [1]



Obr. 3.9. Plazmové hořáky [1]

- a) s plynovou stabilizací s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransformovaným obloukem, c) s vodní stabilizací
- 1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmy, 6 – obrobek, 7 – přívod vody





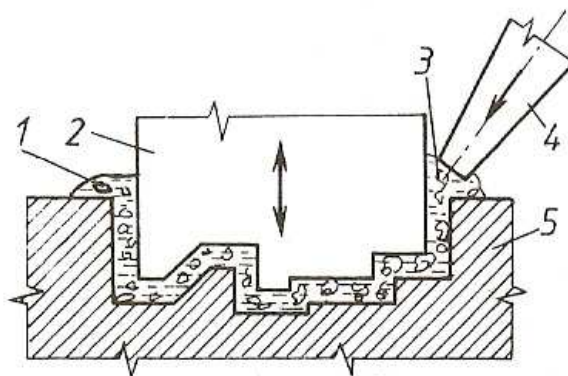
Obr. 3.10. Schéma stroje pro svařování plazmou [1]

1 – kontrolní a řídicí systém, 2 – stabilizační plyn, 3 – zdroj pracovního elektrického oblouku, 4 – anody, 5 – místo svaru, 6 – regulátor tlaku, 7 – zásobník plynu, 8 – systém ovládání pohybů mechanických částí stroje, 9 – podávání svařovacího drátu, 10 – katoda, 11 – zdroj pomocného elektrického oblouku

### 3.1.7. Obrábění ultrazvukem

Obrábění ultrazvukem je řízené rozrušování materiálu obrobku účinkem pohybu zrn abrazivního materiálu a působením kavitační eroze. Jedná se o obrábění založené na mechanickém úběru materiálu. [1]

Princip metody (**obr. 3.11.**): zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá v kolmém směru na obráběný povrch kmity o ultrazvukové frekvenci 18 až 25 kHz. Zrna jsou nástrojem přitlačována řízenou stálou silou na obráběný povrch, čímž dochází k překopírování tvaru pracovní části nástroje do obrobku. Kromě kmitavého pohybu může nástroj vykonávat ještě přímočarý posuvný pohyb, nebo jejich kombinaci. [1]



Obr. 3.11. Princip obrábění ultrazvukem [1]

1 – kapalina, 2 – nástroj, 3 – brousící zrna, 4 – přívod brousících zrn a kapaliny, 5 - obrobek

Dosahované parametry:

[1]

- obrobitelnost materiálů je úměrná jejich tvrdosti a křehkosti (**tab. 3.5.**)
  - obrábět lze elektricky vodivé i nevodivé materiály: sklo, křemík, ferity, germanium, keramické materiály, grafit, kevlar, slinuté karbidy, kalené oceli, polodrahokamy apod., plastické materiály jsou touto technologií neobrobitelné;
- intenzita úběru materiálu závisí na:
  - amplitudě kmitů nástroje (při frekvenci 18 až 25 kHz) je amplituda 30 až 80  $\mu\text{m}$ ,
  - velikost přítlaku nástroje (závisí na velikosti obráběné plochy, amplitudě kmitů nástroje a velikosti brousících zrn, bývá 2 až 30  $\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),
  - koncentraci brusiva v kapalině,
  - druhu brusiva
  - zrnitosti brusiva – volí se pro hrubování 3 až 16  
     pro dokončování 70 až 120  
     pro velmi přesné obrábění 220 až 360  
     (mikroprášky).

Maximální intenzita úběru materiálu je ve směru kmitání nástroje, na bočních plochách nástroje probíhá úběr materiálu s výrazně menší intenzitou. Objem materiálu odebraného jedním zrnem odpovídá přibližně jeho velikosti. Počet současně zabírajících zrn závisí na jeho velikosti koncentraci v kapalině, bývá 30 až 100 x 10<sup>3</sup> na 1 cm<sup>2</sup> obráběné plochy;

- přesnost obrábění
  - průchozí díry do hloubky 3 mm    0,02 až 0,05 mm na průměr,

- plochy o velikosti 40 až 50 mm<sup>2</sup> 0,02 až 0,05 mm,
- neprůchozích dutin 0,05 až 0,1 mm
- kuželovitost děr cca 20' na 1 mm délky díry,  
při použití dokončovacího obrábění mikropráškem pouze 5' až 10' na 1 mm  
délky díry;
- kvalita obrobené plochy Ra = 1,6 až 0,4 μm

Tab. 3.5. Obrobitelnost materiálu ultrazvukem [1]

Obráběný materiál	Relativní (poměrná) obrobitelnost	Obráběný materiál	Relativní (poměrná) obrobitelnost
Sklo	1,0 (etalon)	Křemík	0,5
Rubín	0,9	Keramika	0,3
Ferit	0,8	Achát	0,3
Germánium	0,6 – 0,3	Slinutý karbid	0,05 – 0,02

Technologická aplikace:

[1]

- řezání materiálu (např. dělení tyčí z křemene nebo rubínu) – tloušťka řezaných destiček je do 5 mm, tloušťka nástroje 0,1 až 0,8 mm;
- hloubení průchozích děr – nástroj má tvar trubky, tloušťka obrobku maximálně 8 až 10 mm;
- hloubení dutin – maximální průměr nástroje 120mm, maximální hloubka dutiny 4 až 6 mm;
- broušení rovinných ploch – metodu lze aplikovat na upravené rovinné brusce, úběr materiálu lze realizovat volným brusivem (nástroj je vyroben z měkké konstrukční oceli) nebo diamantovým kotoučem s kovovou vazbou.

## 3.1.8. Obrábění kapalinovým paprskem a proudem brusiva

Obrábění materiálů kapalinovým paprskem je založeno na přeměně kinetické energie molekul kapaliny (příp. směsi kapaliny a zrn brousícího materiálu) na mechanickou práci, za současného působení kavitační koroze. Paprsek pracovní kapaliny vystupuje při vysokých tlacích (200 až 600 MPa) z pracovní trysky rychlostí až čtyřikrát větší než je rychlost zvuku a svým účinkem na okolí se chová jako pevné těleso. V kapalině vznikají za určitých podmínek bubliny vyplněné sytou párou, při jejich zániku vznikají rázy a dochází k vytrhávání částic materiálu z povrchu součásti, tzv. kavitační korozi.

[1]

Proces řezání materiálu probíhá takto: paprsek pracovní kapaliny nejprve prorazí otvor a při následném pohybu vůči obrobku dochází k vytvoření řezné spáry. [1]

Pro řezání materiálů se používá buď čistý kapalinový paprsek, nebo abrazivní kapalinový paprsek, tj. paprsek kapaliny, do něhož se přidávají zrna brousícího materiálu. Jako pracovní kapalinu lze použít jakoukoli kapalinu: čistou, chemicky neupravenou vodu, olej, při řezání cukrářských výrobků kakao apod. Volba druhu pracovní kapaliny se řídí druhem řezaného materiálu, nejčastěji se používá voda. Jako brousící materiál se používají zrna křemičitého písku, olivínu, granátu, kubického nitridu boru apod. o velikosti 0,2 až 0,5 mm. [1]

Úběr materiálu je umožněn: [1]

- v případě čistého kapalinového paprsku tím, že kinetická energie molekul kapaliny se při dopadu na materiál obrobku přemění na mechanickou práci a současně se přitom část molekul kapaliny odpaří a narušuje materiál kavitační korozí;
- u abrazivního kapalinového paprsku přistupuje k uvedeným dvěma účinkům ještě působení zrn brousícího materiálu, kdy se kinetická energie zrn mění při styku s materiálem obrobku na mechanickou práci.

Použití metody a dosahované parametry: [1]

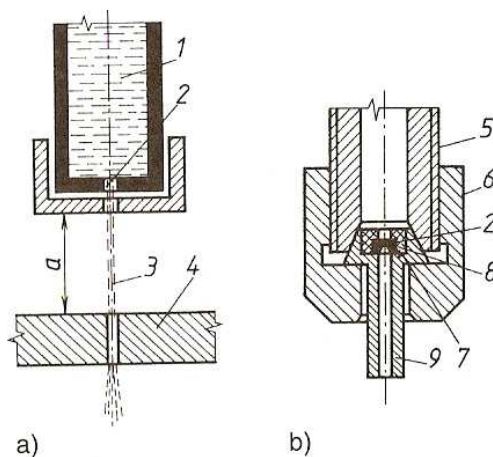
Čistý kapalinový paprsek se používá hlavně pro řezání měkkých a málo houževnatých materiálů. Maximální tloušťka řezaného materiálu je závislá na druhu materiálu obrobku, na tlaku pracovní kapaliny, na rychlosti řezání, na průměru a vzdálenosti řezací trysky od povrchu obrobku. Šířka řezné spáry je 0,1 až 0,3 mm.

Abrazivní kapalinový paprsek je vhodný především pro řezání tvrdých a houževnatých materiálů. Lze řezat materiály o tloušťce více než 100 mm. Maximální tloušťka řezaného materiálu je závislá na druhu materiálu obrobku, pracovním tlaku kapaliny, na průtokovém množství směsi kapaliny a zrn, na množství zrn v kapalině, na druhu a velikosti zrn brousícího materiálu, na rychlosti řezání, vzdálenosti řezací trysky od povrchu obrobku, na průměru trysky přivádějící do pracovní hlavy kapaliny, na průměru trysky přivádějící do pracovní hlavy kapaliny, na průměru a délce řezací trysky. Šířka řezné spáry je 1,1 až 2,5 mm. [1]

Rychlost řezání se pohybuje podle tloušťky a druhu řezaného materiálu od  $5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  (kovy) až do  $2\,000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  (překližky). Přesnost řezaných tvarů a rozměrů je maximálně

$\pm 0,1$  mm u tenkých obrobků (do tloušťky asi 10 mm), u tlustších obrobků je přesnost menší (v rádiusových přechodech až 1 mm). Drsnost obrobeného povrchu  $Ra = 2,5$  až  $12 \mu\text{m}$ , podél tloušťky řezaného materiálu se mění. Nejlepší je na straně vstupu paprsku do materiálu (asi do jedné třetiny) a nejhorší na straně výstupu paprsku z materiálu. Kolmost řezaných stěn je  $0,3$  až  $6,4^\circ$ , řezná spára se směrem od horní plochy obrobku směrem dolů rozšiřuje. [1]

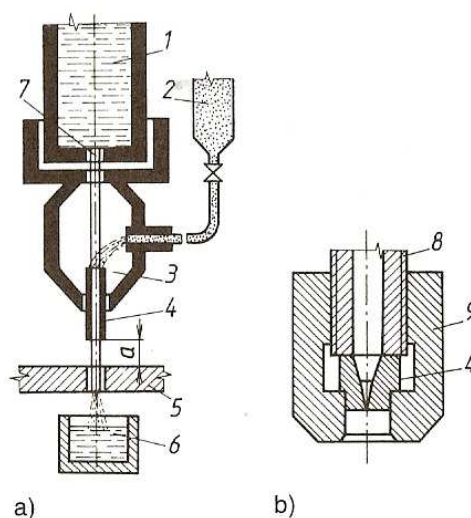
Kapalinový paprsek lze kromě řezání a vyřezávání tvarů provádět také operace vrtání, odstraňování otřepů, úkosování, otryskávání, soustružení a frézování. Lze obrábět všechny druhy kovových i nekovových materiálů, protože v místě řezu nevzniká teplo, je možné obrábět též materiály tepelně zpracované, korozivzdorné oceli, slitiny titanu, neželezné kovy, plasty, vrstvené materiály, materiály plněné kevlarovými nebo skelnými vlákny, gumu, grafit apod. Protože na obrobek působí při obrábění malé řezné síly, lze řezat i tvarově složité a málo tuhé obrobky. [1]



Obr. 3.12. Pracovní řezací hlava pro čistý kapalinový paprsek [1]

a) schéma, b) provedení výstupní safírové trysky

1 – tlaková kapalina, 2 – výstupní tryska, 3 – kapalinový paprsek, 4 – obrobek, 5 – potrubí, 6 – matrice, 7 – lůžko trysky, 8 – držák trysky, 9 – stabilizátor proudu kapalinového paprsku, a – vzdálenost trysky od povrchu obrobku



Obr. 3.13. Pracovní řezací hlava pro abrazivní kapalinový paprsek [1]

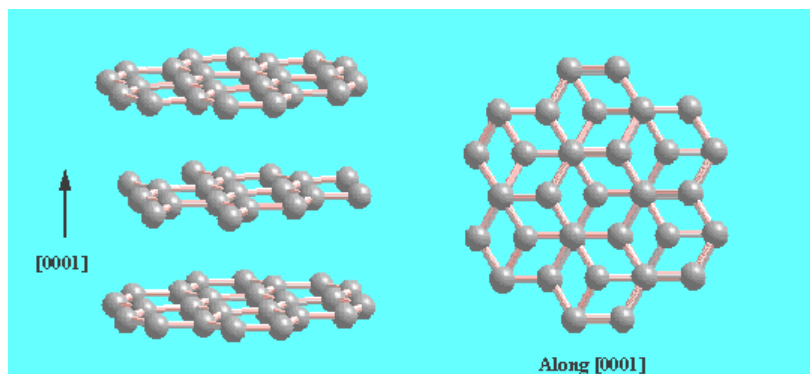
a) schéma, b) provedení výstupní řezací trysky

1 – tlaková kapalina, 2 – zásobník brousících zrn, 3 – směšovací komora, 4 – výstupní řezací tryska, 5 – obrobek, 6 – lapač, 7 – vodní sařírová tryska, 8 – potrubí, 9 – matrice,  
a – vzdálenost trysky od povrchu obrobku

## 3.2 Grafit

### 3.2.1. Vzhled a stavba grafitu

Grafit, chemický vzorec C, je stejně jako diamant chemický prvek uhlík. Je šesterečný nebo klencový minerál. Jeho název pochází z řeckého grafein - psát. Grafit je černošedý až černý, matný až lesklý, na omak mastný. Tvoří šupinky, ploténky, sférické agregáty, zemité výplně, méně často je hrubě lupenitý, dobře omezené krystaly jsou vzácné. Krystaly se vyskytují v přírodě vzácně, mají tvar hexagonálních tabulek. [9]



Obr. 3.14. Krystalová struktura grafitu [7]



### 3.2.2. Vlastnosti grafitu

Je to nekovový, elektricky vodivý materiál. Od diamantu se liší tím, jak jsou v jeho struktuře poskládány jednotlivé atomy uhlíku, a tím jsou také dány jeho vlastnosti, tolik odlišné od diamantu. V grafitu jsou atomy uhlíku uspořádány do vrstviček, které jsou mezi sebou spojeny poměrně slabou vazbou, takže díky tomu je grafit velmi měkký a velmi snadno se otírá o jiné předměty. Tato jeho vlastnost je využívána v obyčejných tužkách, jejichž grafitová psací tuha zanechává čáru na papíře. [9]

Grafit je přírodní materiál bez negativních účinků na lidské zdraví a bez škodlivých vlivů na životní prostředí. Grafitový prach, pokud není znečištěn je plnohodnotným materiálem použitelným při dalších známých aplikacích. Grafit, jako materiál je dokonale nerozpustný a netavitelný. Na vzduchu oxiduje při teplotách okolo 500 °C na plynné oxidy uhlíku. K přeměně grafitu dochází za teplot nad 3 500 °C. [8]

- **Fyzikální vlastnosti:** Píše po papíře, otírá se o prsty (má tvrdost 1), na omak mastný, hustota 2,1 - 2,3 g/cm<sup>3</sup> (kolísá vlivem přímíšenin), štěpnost dokonalá podle 0001, lom nerovný. Bod tání je cca 3 000 °C, elektricky vodivý.
- **Optické vlastnosti:** Barva: černá, tmavě až ocelově šedá. Vryp je tmavě ocelově šedý a lesklý. Průhlednost: neprůhledný. Lesk: kovový až matný
- **Chemické vlastnosti:** Tvořen uhlíkem s příměsemi H, N, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> aj. V kyselinách nerozpustný, reaguje pouze s HNO<sub>3</sub> při povaření. [10]

Tab. 3.6. Vlastnosti grafitu [10]

Obecné	
Kategorie	Minerál
Chemický vzorec	C
Identifikace	
Barva	černá až šedá
Vzhled krystalu	jemně lupenité, zrnité, zemité až celistvé agregáty
Soustava	šesterečná
Tvrdost	1-2
Lesk	kovově lesklý až matný
Štěpnost	velmi dokonalá podle (0001)
Vryp	tmavošedý až černý
Hustota	2,1-2,3 g/cm <sup>3</sup>
Rozpustnost	s kyselinami nereaguje
Ostatní	na omak mastný

### 3.2.3. Vznik, výskyt a využití grafitu

Tvoří pigment ve vápencích a jílovitých břidlicích. Ložiska grafitu vznikají při přeměně usazených hornin ze zbytků organických látek a tvoří vrstvy nebo čočkovitá tělesa v rulách, svorech, fylitech nebo mramorech. Může být také magmatického původu - nalézá se v pegmatitech. [9]

Ekonomicky významná jsou ložiska grafitu v regionálně metamorfovaných horninách, v nichž patrně vznikl přeměnou uhelných slojí a ložisek ropy. Velké množství grafitu se vyrábí uměle z odpadů po zpracování ropy, ze sazí nebo z antracitu. Hlavními producenty grafitu jsou Čína, Indie a Brazílie. V České republice byl grafit těžen v okolí Českého Krumlova, v Bližné j. od Černé v Pošumaví, jz. od Českého Krumlova, ve Chvalovicích zsz. od Českých Budějovic, v Kolodějích nad Lužnicí s. od Týna nad Vltavou, ve Velkém Tresném vsv. od Bystřice nad Pernštejnem a v okolí Starého Města zjz. od Jeseníku. Ložiska v jižních Čechách a na Moravě jsou vázána na grafitické ruly, kvarcity, mramory a amfibolity, v nichž tvoří grafit čočkovitá tělesa. [9]



Obr. 3.15. Hrubý hexagonální krystal 2,3 cm v průměru. Naleziště: Kalangaha Mine, Kalangaha, Sri Lanka [7]

Grafit jako surovina má široké spektrum použití v různých odvětvích průmyslu. Největší množství grafitu se používá v hutnictví a slévárenství, především jako surovina při výrobě žáruvzdorných materiálů. Dále se využívá pro výrobu přísad do oceli a litiny, stejně jako při výrobě uhlíkových elektrod pro obloukové pece. Z běžných předmětů ho nalezneme v tužkách, tzv. uhlíky jsou součástí elektromotorů různých domácích spotřebičů (mixér, automatická pračka, vysavač aj.). Grafitové tyče slouží pro řízení reakcí v jaderných reaktorech. Slouží také jako součást suchých i olejových maziv (grafitová vazelína). [10]

### 3.2.4. Obrobitelnost grafitu

Grafit se musí zpracovávat za sucha. Nedoporučuje se použití emulzí pro vrtání a řezání. Přesto, že je grafit velmi vhodný k opracování tradičními metodami, realizace dobrých elektrod pro elektroerozi není snadná, protože tento materiál se chová zcela opačným způsobem v závislosti na své denzitě a na jemnosti své granulace. Grafit má ve skutečnosti denzitu, která je variabilní vůči tlaku, jímž jsou stlačeny bloky, z nichž je grafit složen. Dále pak denzita ovlivňuje izotropní a anizotropní vlastnosti tohoto materiálu. Především pak elektrická vodivost, jež je faktorem primární důležitosti v dané elektrodě, může být dokonce rozpůlena podél osy vůči jiné ose. Za účelem vyloučení tohoto problému je třeba používat izotropní grafit, tedy grafit o větší hustotě. Z druhé strany použitím anizotropního grafitu, tedy grafitu o menší hustotě, se získá větší opotřebování, ale i větší odebrání materiálu z obrobku. Z tohoto důvodu je vhodné používat grafit o menší denzitě, s cílem získat větší úběr materiálu z obrobku, avšak je nutné použít grafit o vysoké denzitě, pokud je zapotřebí opracovávat tvary s ostrými hranami, a jež předpokládají velké opotřebování. Pokud se naopak týče jemnosti granulace, pak tato určováním drsnosti povrchu elektrody následně ovlivňuje i drsnost opracovávaného obrobku, takže se získá menší drsnost použitím grafitu s jemnou granulací. V tomto posledním případě také těsnost na hranách je lepší a je tedy vhodnější používat grafit s jemnou granulací při opracování zvláště komplikovaných tvarů. [8]

Z mechanického pohledu se grafit zpracovává velmi dobře použitím nástrojů z tvrdých kovů, jako jsou například rychlořezná ocel, karbid z wolframu (K10) nebo diamantovaný kov. Čím je materiál tvrdší, tím obtížněji se obrábí a tím snadněji se vylamuje. Patrné je to hlavně na hranách a místech jemných kontur. Takovéto elektrody se pak musí začistit nebo udělat znovu. Volba materiálu k použití pro opracování ovlivňuje otevřenost řezného úhlu nebo úhlu podbroušení, stejně jako i rychlost řezání. Řezný úhel se musí přibližovat k  $0^\circ$  a v každém případě to musí být úhel kladný, kdežto úhel podbroušení se musí nacházet kolem  $9^\circ$ . Dalším faktorem je životnost nástroje, ta je především ovlivněna abrazivními vlastnostmi grafitu. Pro maximální využití nástrojů a efektivitu opracování se doporučuje volit maximální posuv na zub při hrubování a při finišování by neměla tato hodnota klesnout pod 0,2 mm. Řezná rychlost se pohybuje kolem 125 a 150 m/min při soustružení a mezi 75 a 150 m/min při obrábění. Diamantované nástroje jsou užitečné pouze pro výrobu elektrod v sérii s tím že, potřebují úhel podbroušení i řeznou rychlost vyšší, než jsou shora uvedené hodnoty. V každém případě pomocí shora uvedených materiálů se realizují lepší úrovně přesnosti, kvality

povrchu i životnosti takto získané elektrody. Tato se dobře obrušuje pomocí brusek vhodného složení, snadno se leští hliníkovým prachem zředěným ve vodě. [8]

Grafit nabízí možnost snadného opracování pomocí mechanických metod, je málo podroben deformacím a je málo citelný na tepelné výkyvy. Při realizaci grafitové elektrody o značných rozměrech je specifická váha elektrody značně nižší oproti jiným materiálům použitých k výrobě elektrody. Grafit je možno zpracovávat na všech obráběcích strojích a na jiných tradičních strojích, a to s velkou přesností a s nízkými tolerancemi. Ať již je proces použitého opracování jakýkoli, obrobky si uchovávají svoji rozměrovou stabilitu jak během, tak i po odebrání třísek a okrajové oblasti opracovaných povrchů nepodléhají jakékoli proměně pokud se týká struktury i charakteristik materiálu. Nevýhodou obrábění grafitu je vzniklá vysoká prašnost při obráběním. Při obrábění na mokro se rapidně snižuje životnost nástrojů. [8]

Tab. 3.7. Obrobitelnost grafitu – řezné parametry [8]

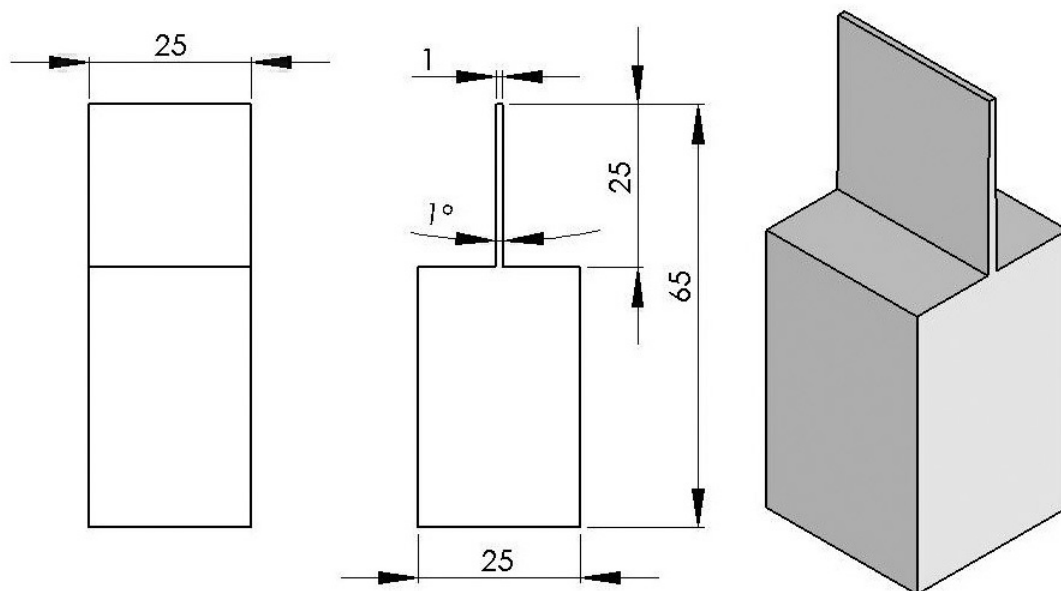
Opracování	Řezná rychlost	Posuv	Odebírání třísek
<b>Vrtání</b>	40 - 60 m/min	0,1 - 0,2 mm/ot.	-----
<b>Vnější soustružení</b>			
Hrubování	150 - 250 m/min	0,3 - 0,4 mm/ot.	10 - 20 mm
Dokončování	250 - 400 m/min	0,05 - 0,2 mm/ot.	0,2 - 0,8 mm
<b>Vnitřní soustružení</b>			
Hrubování	150 - 250 m/min	0,2 - 0,3 mm/ot.	4 - 8 mm
Dokončování	250 - 400 m/min	0,05 - 0,2 mm/ot.	0,1 - 0,5 mm
<b>Obrábění</b>			
Hrubování	70 - 150 m/min	160 - 400 mm/min	5 - 12 mm
Dokončování	120 - 200 m/min	100 - 200 mm/min	0,5 - 2 mm
<b>Broušení</b>			
Hrubování	20 - 30 m/sek	200 - 250 mm/min	3 - 5 mm
Dokončování	20 - 30 m/sek	200 - 250 mm/min	0,02 - 0,3 mm

## **4 Návrh metodiky experimentů**

Při experimentu budeme používat nástrojové elektrody vyrobené ze dvou druhů grafitového materiálu. Grafit EDM - 1 od americké firmy POCO Graphite, Inc. a grafit HK - 20 od japonské firmy TOKAI CARBON CO., LTD. Obě elektrody budou tvarově a rozměrově stejné, budou mít stejný tvar žebra (**viz. 4.1 Návrh tvaru nástrojové elektrody**). Elektrody budou obrobeny na požadovaný tvar pomocí CNC frézky RÖDERS RP 500. Pro frézování každého vzorku nástrojové elektrody je použito stejného programu pro CNC obráběcí stroj. Takto obrobené elektrody budou připraveny k samotnému experimentu na elektroerozivním hloubícím stroji (**viz. 4.4 Obráběcí stroj**). Pomocí vzorků elektrod budeme hloubit do materiálu ČSN 41 9552 (**viz. 4.3 Materiál obrobku**). Grafitové nástrojové elektrody upevníme do nástrojových držáků, které využívá elektroerozivní stroj. Nástrojový držák zajišťuje jednotný nulový bod pro všechny pracoviště, kterými elektroda prochází. Přesnost upnutí do držáku je kontrolováno pomocí 3D měřicího centra. Experiment je zaměřen pouze na hrubovací cyklus obrábění. Budeme provádět dvě série experimentů obou grafitových nástrojových elektrod. V nastavení elektroerozivního obráběcího stroje bude zvolena pro každý grafit vhodná technologie obrábění. V první sérii vzorků bude technologie obrábění nastavena automaticky softwarem obráběcího stroje dle vlastností grafitu, velikosti a tvaru nástrojové elektrody, druhu obráběcího procesu. V druhé sérii vzorků bude technologie obráběcího stroje upravena pro oba vzorky dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc., která udává parametry pro lepší, výkonnější a účinnější metodiku obrábění. Technická příručka této firmy vznikla výzkumem a testováním při různě nastavených kritériích EDM procesů (**viz. 5.1 - Diskuze experimentu B**). Po dokončení každého obráběcího cyklu provedeme zaznamenání celkového času obrobení dané dutiny nástrojovou elektrodou. Dále pak provedeme přeměření jednotlivých vzorků nástrojových elektrod ve směru kolmém na obráběný povrch. Důvodem měření nástrojové elektrody je její opotřebení v důsledku eroze při obráběcím procesu. Velikost opotřebení elektrody nám ovlivňuje přesnost rozměru a přenesený detail - tvar na obrobku, docílený hrubovacím procesem při hloubení. Výsledné opotřebení, které je vzniklé opalem elektrody, zaznamenáme. U hrubovacího cyklu elektroerozivního obrábění chceme dosáhnout především co největší úběr materiálu s nejmenším možným opotřebením elektrody. Potřebujeme také docílit krátkých obráběcích časů součástí a tím zvýšit produktivitu obráběcího procesu. Zaznamenanými výsledky uskutečníme porovnání vzájemné zaměnitelnosti grafitových materiálů vhodných pro nástrojové elektrody k elektroerozivnímu obrábění a poté provedeme vhodné doporučení s přihlédnutím k technicko-ekonomickému zhodnocení.

## 4.1 Návrh tvaru nástrojové elektrody

Žebro nástrojové elektrody má rozměry 25 x 25 x 1 mm s úkosem 0,5° na stěnu. (viz. Příloha G – Výkres žebra elektrody). Elektroerozivní obráběcí stroj bude nástrojovou elektrodou hloubit do hloubky 20 mm.



Obr. 4.1. Model nástrojové elektrody



Obr. 4.2. Nástrojová elektroda upnutá v nástrojovém držáku EDM obráběcího stroje



## 4.2 Materiál nástroje

### 1.) Grafit EDM - 1

výrobce: **POCO Graphite, Inc.**

dodavatel pro český trh: **Tedok spol.s.r.o.**

Tab. 4.1. Typické vlastnosti grafitu EDM - 1 [12]

Typ grafitu	Velikost částic [μm]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tvrdost (Shore) [HSh]	Měrný elektrický odpor [μΩm]
<b>EDM - 1</b>	< 5	68,2	69	19,3

Grafit s ultra jemnou zrnitostí, vhodný pro hrubovací i dokončovací operace. Odolný vůči opotřebení, umožňuje vysokou rychlosti obrábění a jemné opracování povrchu dutiny. Uplatňuje se zejména při hloubení žeber. Dobře se frézuje a řeže na drátovce.

Použití: elektrody se složitými detaily,

hrubovací a dokončovací elektrody s malým opotřebením,

formy na plasty a lití kovů.

[12]

### 2.) Grafit HK - 20

výrobce: **TOKAI CARBON CO., LTD.**

dodavatel pro český trh: **SINOGRAPH SA**

Tab. 4.2. Typické vlastnosti grafitu HK - 20 [13]

Typ grafitu	Velikost částic [μm]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tvrdost (Shore) [HSh]	Měrný elektrický odpor [μΩm]
<b>HK - 20</b>	6	66	60	12

Podrobnější vlastnosti a použití grafitu HK - 20 výrobce ani dodavatel neuvádí.

## 4.3 Materiál obrobku

Pomocí grafitových nástrojových elektrod budeme hloubit do materiálu 19 552, ČSN 41 9552 (ISO 4957, EN 96-79), zakaleného na 52 HRC. Jedná se o nástrojovou středně legovanou Cr - Mo - V ocel určenou pro práci za tepla. Tato ocel se používá na nástroje pro stříhání za tepla. Malé až velké, tepelně namáhané nože strojních nůžek, dále střižníky, střižnice při velkých nárocích na houževnatost, zejména při stříhání materiálů větších tloušťek. Nástroje pro tváření za tepla. Malé až středně velké, tepelně velmi namáhané

zápustky i jiné nástroje pro kování na lisech při velkých nárocích na houževnatost. Nástroje je možno chladit při provozu vodou. Menší, ale i rozměrnější i velmi namáhané lisovací trny pro lisování dutých těles. Rozměrnější, velmi výkonné nástroje k protlačování Ni, Cu, Al, Mg, Zn a jejich slitin. Mimo jiné se používá na menší, ale i rozměrnější, velmi výkonné, funkční části forem a lisů, pro tlakové lití Al, Mg, Zn, Pb a jejich slitin (viz. norma ČSN 41 9552).

Tab. 4.3. Chemické složení oceli ČSN 41 9552

Chemické složení [hm. %]							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
0,32-0,42	0,2-0,5	0,8-1,2	max 0,03	max 0,03	4,5-5,5	1,1-1,6	0,35-0,6

Tab. 4.4. Mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 9552

Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Mez kluzu v tlaku $R_{et}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
1 050 – 1 650 (při tvrdosti 40 - 53 HRC)	1 220 – 1 880 (při tvrdosti 40 - 53 HRC)	1 150 - 1 750 (při tvrdosti 40 - 53 HRC)	12 - 15 (při tvrdosti 40 - 53 HRC)	53 - 59 (při tvrdosti 40 - 53 HRC)

Vrubová houževnatost KCU 2 [J·cm <sup>-2</sup> ]	Tvrdost HRC
45 - 88 (při tvrdosti 40 - 53 HRC)	40 - 53

Podrobnější informace o vlastnostech a použití materiálu je v materiálových listech (viz. Příloha A - Materiálové listy materiálu ČSN 41 9552).

## 4.4 Obráběcí stroj

Pro obrobení povrchu nástrojovou elektrodou jsme použili elektroerozivní obráběcí stroj AGIE Agietron Impact 3. Stroj využívá pro elektroerozivní hloubení firma Forez s.r.o. od roku 2002.

Základní údaje o stroji AGIE Agietron Impact 3:

Tab. 4.5. Základní údaje AGIE Agietron Impact 3 [11]

Pracovní vana	spouštěcí
Rozměr obrobku X/Y/Z	1 070 x 530 x 350 mm
Rozměr obrobku X/Y/Z	880 x 680 x 350 mm *výměník
Rozjezd os X/Y/Z	500 x 350 x 500 mm
Váha obrobku do	800 kg
Stůl-hlava min/max	200/700 mm
Váha elektrody do	200 kg
CNC řízení	Agie Vision 2
Generátor AGIE IPG	72/104 A
Dielektrikum	620 litrů
Odměřování	digitální
C-osa 360°	opce
Výměník elektrod	6/8/16 opce
Robot	nemá
Upínání	EROWA/ITS, 3R/MAKRO, MECATOOL/GPS, HIRSCHMANN/SYSTÉM H



Obr. 4.3. Elektroerozivní obráběcí stroj - AGIE Agietron Impact 3 [11]

## 5 Diskuze experimentů

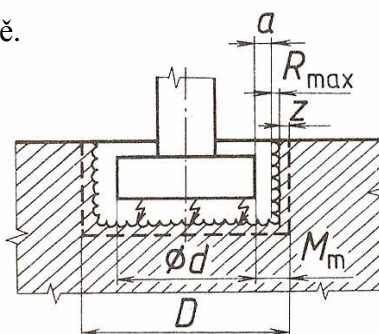
- Varianta experimentu A - nastavení EDM stroje dle softwaru stroje.
- Varianta experimentu B - nastavení EDM stroje dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc.

### 5.1 Varianta experimentu A - nastavení EDM stroje dle softwaru stroje

Nastavení elektroerozivní obráběcího stroje dle softwaru stroje provádí uživatel stroje. V softwaru obráběcího stroje AGIE se nastavují základní informace o elektrodě a hloubícím procesu. Např. dosažená drsnost povrchu nastavovaného procesu obrábění, výběr vhodného cílové technologie (pro minimální opotřebení, nejmenší drsnost povrchu, maximální úběr, minimální bílou vrstvu), tvar a rozměr elektrody, druh materiálu (velikost zrna), podrozměr elektrody. Na základě těchto technologických parametrů software stroje zvolí nejvhodnější technologii obrábění, která však jde dále upravovat uživatelem. Po nastavení EDM obráběcího stroje, dle nástrojové elektrody a požadovaného hrubovacího procesu s největším odběrem materiálu při minimálním opotřebení elektrody, nám software zvolil technologické parametry s názvem impulsu 113600 pro nástrojovou elektrodu z grafitu EDM - 1.

Pro nástrojovou elektrodu z grafitu HK - 20 zvolil stroj technologii s názvem impulsu 213800. Dalším důležitým technologickým hlediskem je nastavení podrozměru elektrody, který má vliv na požadovaný tvar dutiny. Podrozměr elektrody je nastavován automaticky softwarem stroje na základě zvolené technologie (**viz. Příloha E, F - Nastavení podrozměru elektrody pro zvolenou technologii**) s daným názvem impulsu nebo je možné podrozměr upravit v nastavení EDM stroje ručně.

Podrozměr elektrody =  $D - d$  [mm]



Obr. 5.1. Stanovení rozměru hrubovací nástrojové elektrody [1]

$d$  - je průměr nástrojové elektrody,  $D$  - požadovaný rozměr dutiny,  $a$  - velikost pracovní mezery,  $R_{\max}$  - požadovaná drsnost obrobeného povrchu,  $z$  - tloušťka narušeného povrchu

$M_m$  - minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru dutiny

EDM stroj nám pro daný grafit zvolil technologii s názvem impulzu a podrozměrem:

1.) Grafit EDM - 1

název impulzu: 113600

podrozměr: 0,2 mm

2.) Grafit HK - 20

název impulzu: 213800

podrozměr: 0,2 mm

Vysvětlivka názvu impulzu:

113600 – xxxxxx – Technologie určená pro grafit o zrnitosti < 5µm, při hloubení do oceli s dosaženou drsností 36 VDI (**viz. Příloha H – Drsnost VDI**) a se standardním impulzem.

Tab.5.1. Vysvětlivka jednotlivých číslic v názvu impulzu [14]

1.číslo	2.číslo	3.číslo	4.číslo	5.číslo	6.číslo
Materiál elektrody	Materiál obrobku	Drsnost VDI		Druh technologie impulzu	Rezervní

Tab. 5.2. Vysvětlivka názvu impulzu - 1. a 2. číslovka - materiál elektrody - materiál obrobku [14]

1.číslo	Materiál elektrody	2.číslo	Materiál obrobku
0xxxxx	Hliník	-	-
1xxxxx	Grafit 1 ( < 5 µm )	x1xxxx	Ocel
2xxxxx	Grafit 2 ( 5 - 10 µm )	X2xxxx	Těžké kovy
3xxxxx	Grafit 3 ( > 10 µm )	x3xxxx	Hliník

Tab. 5.3. Vysvětlivka názvu impulzu - 5. číslovka - druh technologie impulzu [14]

5.číslo	Druh technologie impulzu
xxxx0x	Standartní impulz
xxxx1x	Impulz pro maximální odběr materiálu
xxxx2x	Jiný impulz

Tab. 5.4. Technologické parametry zvolené softwarem stroje pro obrábění jednotlivých druhů grafitů: [14]

impulse name	ontime	offtime	peak current	mode	voltage	c-box	compression	gain	servo mode	polarity	frontal impulse undersize step (1,...,n-1)	frontal impulse undersize step(n)
NAME	T	P	I	MODE	U	c-box	COMP	GAIN	SM	POL	M(F)	2GAP(F)
(pos)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)	(A)	(pos)	(V)	(pos)	(%)	(pos)	(pos)	(+ , - , $\pm$ )	(mm)	(mm)
113600	56	37	21	11	100	0	35,3	15	0	+	0,41	0,21
213800	116	56	21	10	100	0	25,1	15	0	+	0,43	0,19

lateral impulse undersize step (1,...,n-1)	lateral impulse undersize step (n)	block charge voltage	VDI3400 class	arithmetic height	average peak-to-valley height	removal rate	relativ wear	active electrode surface	planetary feed motion increment	planetary rotation speed
M(L)	2GAP(L)	Uhps	K	Ra	Rz	Vw	THETA	Fp	INC	OMEGA
(mm)	(mm)	(V)	(pos)	( $\mu$ m)	( $\mu$ m)	(mm <sup>3</sup> /min)	(%)	(cm <sup>2</sup> )	(mm)	(1/min)
0,328	0,168	75	36	6,32	34,03	98	0,4	0,15	2,2163872	10
0,344	0,152	75	38	7,96	41,98	85	0,4	1	3,1181248	10

Tab.5.5. Legenda technologických parametrů [14]

Označení	Jednotka	Popis
<b>NAME</b>	(pos)	Název impulzu - souhrn všech parametrů, které tvoří daný impulz
<b>T</b>	( $\mu$ s)	Doba impulzu
<b>P</b>	( $\mu$ s)	Doba mezi impulzy
<b>I</b>	(A)	Velikost proudu
<b>MODE</b>	(pos)	Tvar impulzu
<b>U</b>	(V)	Velikost napětí
<b>C</b>	(pos)	Nastavení preference pro těžké kovy, povrchy s přesností < 0,6 $\mu$ m u mědi/oceli
<b>COMP</b>	(%)	Tlak stroje do materiálu
<b>GAIN</b>	(pos)	Nastavení serva
<b>SM</b>	(pos)	Nastavení serva: SM 0 = pomocí měření Tau SM 1 = pomocí měření průměrného napětí SM 2 = pomocí Fuzzy Logic
<b>POL</b>	(+ , - , $\pm$ )	Polarita elektrody
<b>M(F)</b>	(mm)	2 GAP (celková jiskrová mezera) + 2 x přídavek na drsnost + přídavek na dokončovací elektrodu (čelní)
<b>2GAP(F)</b>	(mm)	Celková jiskrová mezera (čelní)
<b>M(L)</b>	(mm)	2 GAP (celková jiskrová mezera) + 2 x přídavek na drsnost + přídavek na dokončovací elektrodu (boční)
<b>2GAP(L)</b>	(mm)	Celková jiskrová mezera (boční)
<b>Uhps</b>	(V)	Napájecí napětí
<b>K</b>	(pos)	Drsnost (VDI 3400)
<b>Ra</b>	( $\mu$ m)	Střední aritmetická úchylka profilu Ra
<b>Rz</b>	( $\mu$ m)	Největší výška profilu Rz
<b>Vw</b>	(mm <sup>3</sup> /min)	Úběr materiálu
<b>THETA</b>	(%)	Opotřebení elektrody
<b>Fp</b>	(cm <sup>2</sup> )	Aktivní plocha elektrody při obrábění
<b>INC</b>	(mm)	Přírůstek při rotování elektrody
<b>OMEGA</b>	(l/min)	Počet otáček elektrody při rotačním pohybu elektrody



Při nastavení EDM obráběcího stroje pro nástrojovou elektrodu daného tvaru z grafitu HK - 20 nám software stroje vyhodnotil jako vhodnou technologii pro obrábění technologii s názvem impulsu 213800. Kdyby byly oba grafitové materiály zaměnitelné, software stroje by nám vyhodnotil jako vhodnou technologii pro obrábění danou nástrojovou elektrodou o technologii s názvem impulsu 113600. Tuto technologii zvolil stroj při hloubení elektrodou o stejném tvaru, rozměru a pro obrábění stejného materiálu z grafitu EDM - 1. Při zadávání technologických parametrů do stroje se podstatně promítnul fakt, že nástrojová elektroda vyrobená z grafitu HK - 20 má zrnitost 6  $\mu\text{m}$  a tudíž spadá do třídy Grafitu 2 (zrnitost grafitu 5 - 10  $\mu\text{m}$ ). Naproti tomu grafit EDM - 1 spadá do třídy Grafitu 1 (zrnitost grafitu < 5  $\mu\text{m}$ ). Proto software stroj vyhodnotil jako vhodný impuls s názvem 213800. Dodavatel však uvádí, že daný grafit HK - 20 je schopný dosahovat stejných obráběcích parametrů jako grafit EDM - 1, při stejné nastavených parametrech eroze. Tudíž si můžeme dovolit během nastavování technologie obráběcího procesu stroje zvolit u materiálu nástrojové elektrody pro obrábění, materiál Grafit 1 se zrnitostí < 5  $\mu\text{m}$ . U varianty experimentu A tedy provedeme zkušební obrábění pomocí 3 vzorků nástrojových elektrod.

Tab.5.6. Vyhodnocení experimentu A - nastavení EDM stroje dle softwaru stroje:

Typ grafitu	Velikost částic [ $\mu\text{m}$ ]	Velikost částic zvolená při nastavení EDM technologie [ $\mu\text{m}$ ]	Název impulsu [pos]	Celková doba obrábění dutiny [min]	Opotřebení elektrody [mm] / Opotřebení elektrody THETA [%]	Úběr Materiálu Vw [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]
<b>EDM - 1</b>	< 5	Grafit 1 ( < 5 $\mu\text{m}$ )	113600	95,4	0,22 / 1,1	6,16
<b>HK - 20</b>	6	Grafit 2 ( 5-10 $\mu\text{m}$ )	213800	116,9	0,14 / 0,7	5,02
<b>HK - 20</b>	6	Grafit 1 ( < 5 $\mu\text{m}$ )	113600	81	0,45 / 2,25	7,25

Př. výpočtů opotřebení elektrody THETA [%] při hloubení do hloubky 20 mm pro grafit EDM - 1:

$$\text{THETA} = (\text{Opotřebení elektrody [mm]} / \text{hloubka hloubení [mm]}) \cdot 100$$

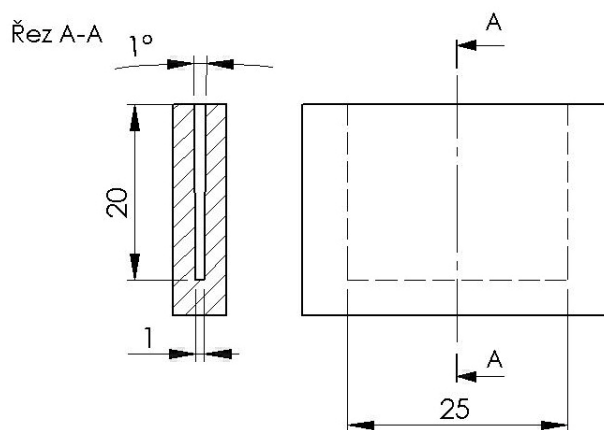
$$= (0,22 / 20) \cdot 100 = \underline{1,1\%}$$

Př. výpočtů úběru materiálu Vw [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ] pro grafit EDM-1:

$$\text{Objem hloubené části: } V = 587,27 \text{ mm}^3$$

$$\text{Celková doba obrábění: } t = 95,4 \text{ min}$$

$$V_w = \frac{V}{t} = \frac{587,27}{95,4} = \underline{6,16 \text{ mm}^3 / \text{min}}$$



Obr. 5.2. Tvar a rozměry hloubené dutiny

Souběžně s experimentem nástrojových elektrod z grafitu EDM - 1 a HK - 20, pro hrubovací proces, byl prováděn stejný experiment pro nástrojové elektrody z grafitu EDM - 150 a EDM - 200 od výrobce POCO Graphite, Inc. Jejich vyhodnocení podle metodiky experimentu A:

Tab.5.7. Vyhodnocení experimentu A - nastavení EDM stroje dle softwaru stroje:

Typ grafitu	Velikost částic [μm]	Velikost částic zvolená při nastavení EDM technologie [μm]	Název impulzu [pos]	Celková doba obrábění dutiny [min]	Opotřebení elektrody [mm] / Opotřebení elektrody THETA [%]	Úběr Materiálu Vw [mm <sup>3</sup> /min]
<b>EDM-150</b>	<14	Grafit 3 ( > 10 μm )	313800	147,6	0,03/0,15	3,98
<b>EDM-200</b>	<10	Grafit 2 ( 5-10 μm )	213800	69,1	0,00/0	8,5

## 5.2 Varianta experimentu B – nastavení EDM stroje dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc.

Při nastavení technologie EDM stroje jsme vycházeli z původně nastavené technologie s vybraným názvem impulzu 113600 pro daný typ grafitového materiálu nástrojové elektrody. U softwarem stroje zvolené technologie hloubení jsme však upravili některé parametry obrábění, které byly určeny z diagramů technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc. Snadno odečitelné výkonnostní diagramy zobrazují jednotlivé parametry všech druhů grafitů POCO a jejich použití u většiny obecně známých kovů. Každý výkonnostní diagram obsahuje grafy, které definují úběr kovového materiálu, opotřebení rohů a ploch, příslušnou jakost povrchu pro specifické nastavení stroje, kombinace kovového obrobku s materiálem elektrody. Příručka je vytvořena pro obrábění nástrojové oceli, nerezové oceli, hliníku, titanu, karbidu wolframu a dalších. U diagramů technické příručky jsem se zabýval pouze změnou

parametrů zvyšující produktivitu obrábění u hrubovacího procesu. U procesu hrubování jsme chtěli docílit především co největšího úběru materiálu s minimálním opotřebením nástrojové elektrody bez ohledu na docílenou drsnost povrchu. Dle diagramu, pro hloubení do materiálu nástrojové oceli ČSN 41 9552 pomocí nástrojové elektrody vyrobené z grafitu EDM - 1, jsme zvolili změnu velikosti proudu na nejbližší vyšší velikost proudu pro větší úběr materiálu z  $I = 21 \text{ A}$  na  $I = 25 \text{ A}$ , při zachování stability procesu viz. diagram firmy POCO Graphite, Inc. (**viz. obr. 5.4.**). EDM obráběcí stroj AGIE Agietron Impact 3 nám však nedovolil nastavit hodnotu proudu  $I = 25 \text{ A}$ . Proto jsme zvolili nejbližší proud  $I = 29 \text{ A}$  vhodný pro hrubovací proces, který nám stroj povolil nastavit. Dále jsme změnili dobu výplachu mezi jednotlivými pulzy P, tzv. OFF - TIME parametr. EDM stroj využívá pulzního vyplachování, které spočívá v krátkém přerušení procesu elektroeroze za současného oddálení nástrojové elektrody od obrobku (o 0,02 až 10 mm), čímž se zvětší pracovní mezera a dosáhne se jejího dokonalého vypláchnutí. Tuto dobu výplachu P jsme změnili z původní hodnoty  $P = 37 \mu\text{s}$  na  $P = 2 \mu\text{s}$  opět z diagramu firmy POCO Graphite, Inc. (**viz. obr. 5.4.**). Snížení tohoto parametru by jsme měli dosáhnout kratšího času celkového obráběcího procesu. Nevýhodou však je zhoršení tepelné stability procesu obrábění (ovlivňuje výslednou přesnost obrábění). U hrubovacího procesu na výslednou přesnost obrábění neklademe vysoké nároky. Krátký výplach však může vést ke vzniku zápalů, také může docházet ke zhoršenému odvodu nečistot vzniklých při obrábění (zejména částec odebraného kovu). Při nízké hodnotě výplachu P vznikají zápaly. Čím je hodnota výplachu P vyšší, tím je proces eroze stabilnější. Dochází však k prodlužování obráběcích časů. Výrobce grafitového materiálu HK - 20 TOKAI CARBON CO., LTD. technickou příručku udávající parametry pro lepší, výkonnější a účinnější metodiku obrábění nevydává. Z důvodu zjištění zaměnitelnosti grafitových materiálů pro hrubovací nástrojovou elektrodu jsme pro hloubení nástrojovou elektrodou vyrobenou z grafitu HK - 20 zvolili stejnou změnu parametrů jako u grafitového materiálu EDM - 1. Podrozměr elektrody byl u obou dvou grafitových elektrod nastaven 0,2 mm na stěnu. U varianty experimentu B tedy provedeme zkušební obrábění pomocí 2 vzorků nástrojových elektrod.

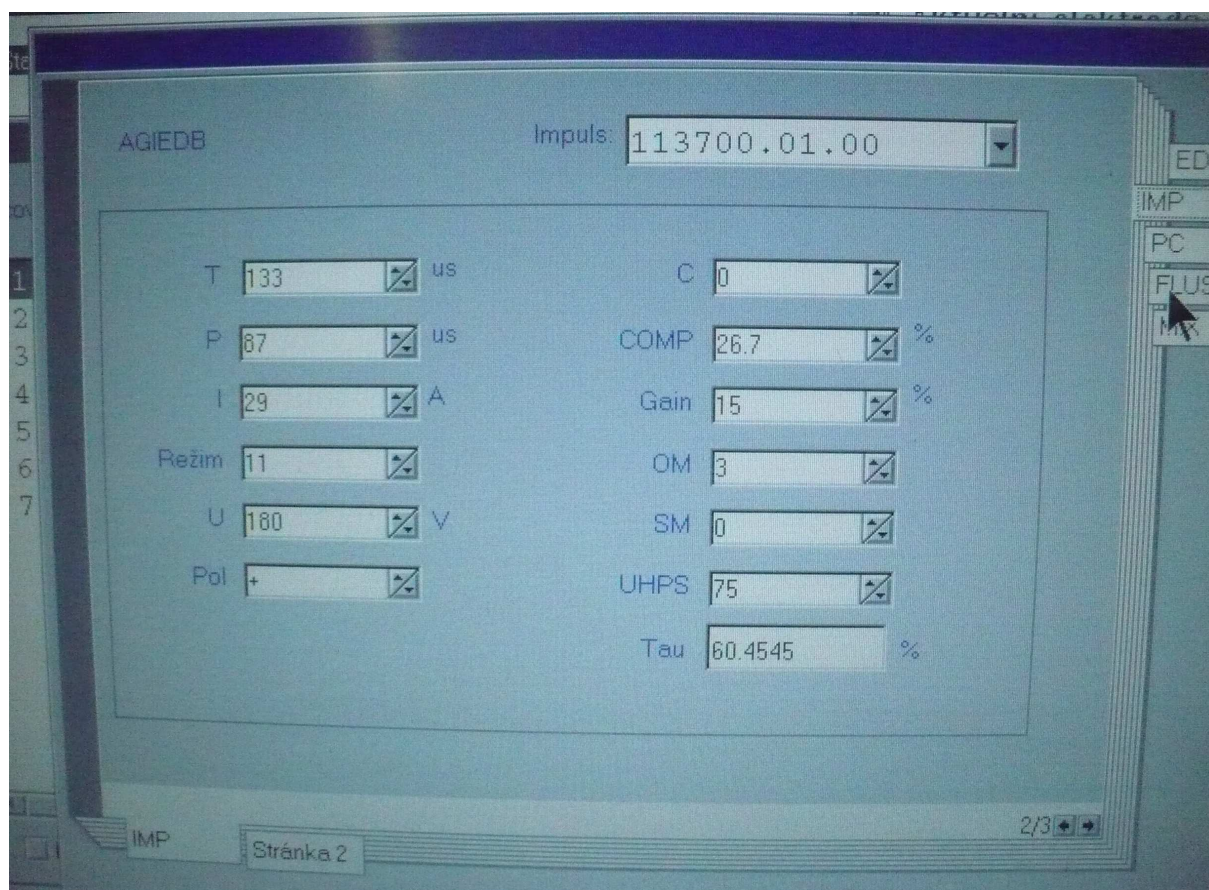
Tab.5.8. Vyhodnocení experimentu B - nastavení EDM stroje dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc.:

Typ grafitu	Velikost částic $[\mu\text{m}]$	Velikost částic zvolená při nastavení EDM technologie $[\mu\text{m}]$	Název impulsu [pos]	Celková doba obrábění dutiny [min]	Opotřebení elektrody [mm] / Opotřebení elektrody THETA [%]	Úběr materiálu $V_w$ $[\text{mm}^3/\text{min}]$
<b>EDM - 1</b>	< 5	Grafit 1 ( < 5 $\mu\text{m}$ )	113600	67	0,22 / 1,1	8,77
<b>HK - 20</b>	6	Grafit 1 ( < 5 $\mu\text{m}$ )	113600	55	0,40 / 2,0	10,68

Souběžně s experimentem nástrojových elektrod z grafitu EDM - 1 a HK - 20, pro hrubovací proces, byl prováděn stejný experiment pro nástrojové elektrody z grafitu EDM - 150 a EDM - 200 od výrobce POCO Graphite, Inc. Jejich vyhodnocení podle metodiky experimentu B:

Tab. 5.9. Vyhodnocení experimentu B - nastavení EDM stroje dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc.:

Typ grafitu	Velikost částic [μm]	Velikost částic zvolená při nastavení EDM technologie [μm]	Název impulsu [pos]	Celková doba obrábění dutiny [min]	Opotřebení elektrody [mm] / Opotřebení elektrody THETA [%]	Úběr materiálu Vw [mm <sup>3</sup> /min]
<b>EDM-150</b>	< 14	Grafit 3 ( > 10 μm )	313800	68	0,61/3,05	8,64
<b>EDM-200</b>	< 10	Grafit 2 ( 5-10 μm )	213800	71	0,44/2,2	8,27

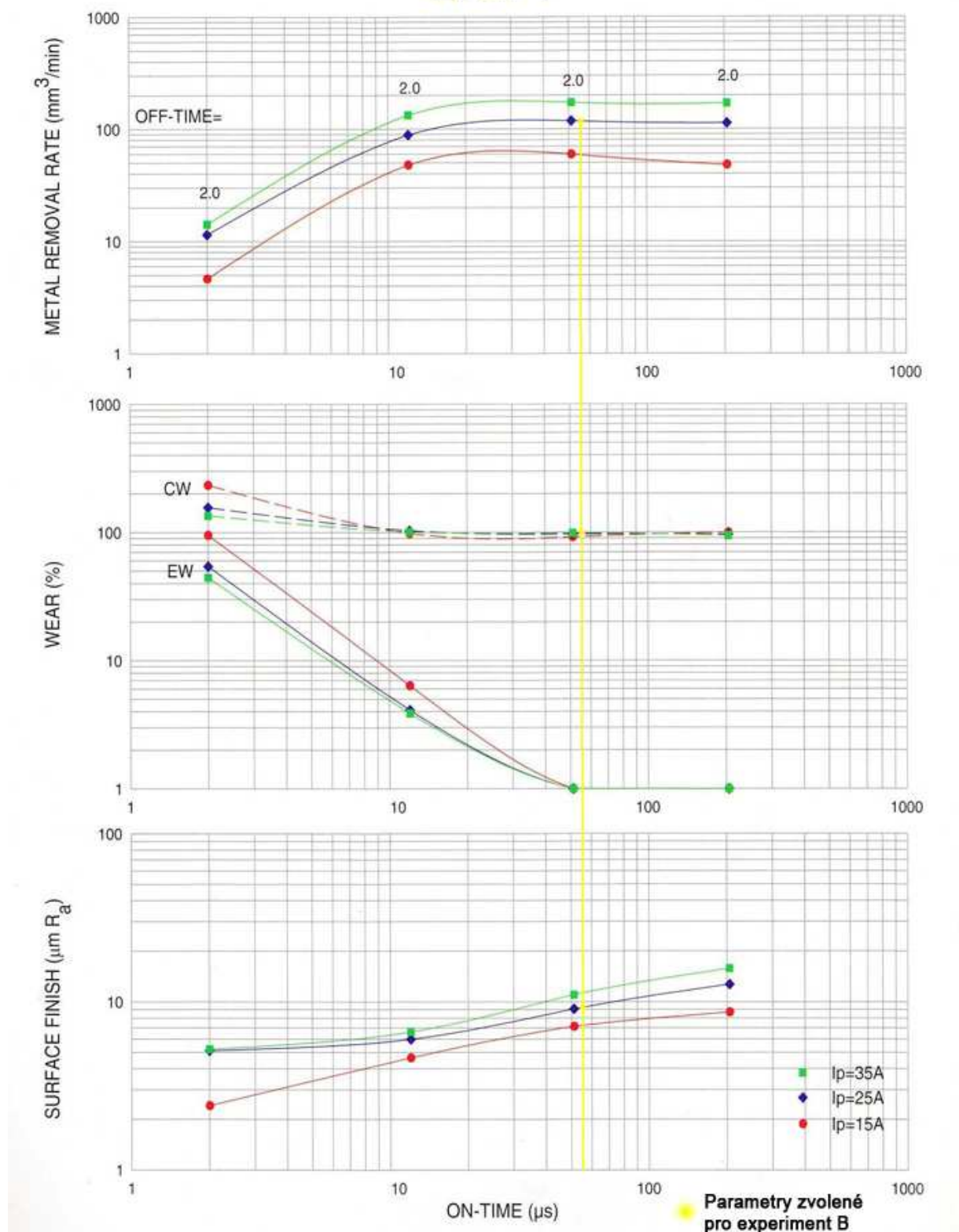


Obr. 5.3. Softwarové prostředí, pro nastavení parametrů technologie obráběcího stroje AGIE Agietron Impact 3

TOOL STEEL 06  
POSITIVE POLARITY  
EP SERVO

# EDM PERFORMANCE

## EDM-1



Obr. 5.4. Diagram pro obrábění nástrojovou elektrodou vyrobenou z grafitu EDM - 1 do oceli od výrobce grafitu POCO Graphite, Inc. [15]



## 6 Technicko ekonomické zhodnocení

Tab. 6.1. Technicko ekonomické zhodnocení grafitových materiálů

Varianta A						
Typ grafitu	Velikost částic [μm]	Velikost částic zvolená při nastavení EDM technologie [μm]	Celková doba obrábění dutiny [min]	Opotřebení elektrody [mm] / Opotřebení elektrody [%]	Úběr materiálu [mm <sup>3</sup> /min]	Cena [dm <sup>3</sup> ]
EDM - 1	< 5	Grafit 1 ( < 5 μm )	95,4	0,22 / 1,1	6,16	100 %
HK - 20	6	Grafit 1 ( < 5 μm )	81	0,45 / 2,25	7,25	-39,5% EDM - 1
HK - 20	6	Grafit 2 ( 5 - 10 μm )	116,9	0,14 / 0,7	5,02	-39,5% EDM - 1
Varianta B						
EDM - 1	< 5	Grafit 1 ( < 5 μm )	67	0,22 / 1,1	8,77	100 %
HK - 20	6	Grafit 1 ( < 5 μm )	55	0,40 / 2,0	10,68	-39,5% EDM - 1

Z naměřených hodnot experimentu A pro oba druhy grafitových materiálů se zvolenou technologií s názvem impulzu 113600 jsme zjistili, že při elektroerozivním hloubení nástrojovou elektrodou vyrobenou z grafitu EDM - 1 jsme dosáhli o 15 % menšího úběru materiálu než nástrojovou elektrodou z grafitu HK - 20. Větší úběr materiálu u grafitu HK - 20 je způsobeno větší velikostí zrna. Zrno o větší velikosti naruší větší a hlubší část obráběného materiálu. Velikost zrna nám výrazně ovlivňuje rychlost EDM procesu. Opotřebení nástrojové elektrody HK - 20 je však více jak dvojnásobné. Vysoké opotřebení u grafitu HK - 20 je způsobeno větší velikostí částic grafitu - zrnitostí. Při elektroerozivním obrábění dochází také k erozi elektrody. Erodování větších částic grafitu, s větší pórovitostí jednotlivých částic, má za následek větší opotřebení elektrody. Tudíž malá zrnitost grafitu má za následek menší opotřebení elektrody. Z toho plyne, že pokud je elektroda schopna odolávat úspěšně erozi v nejzranitelnějších - tvarově složitých místech, pak je možno minimalizovat celkové opotřebení a dosáhnout maximální životnosti elektrody. Při minimálním opotřebení lze elektrodu použít opakovaně, bez jejího obnovení nebo vyrobení nové elektrody. Erozi nástrojové elektrody nelze zabránit, avšak volbou správného materiálu elektrody a kombinací materiálu obrobku s optimálním nastavením obrábění je možné ji minimalizovat. Celková doba obrábění dutiny je u elektrody z grafitu HK - 20 o 14 min kratší než u grafitu EDM - 1, což je pro zvyšování produktivity práce výrazné pozitivum. Naměřené hodnoty u stejného experimentu pro grafit HK - 20 se zvolenou technologií s názvem impulzu 213800, který jsme zvolili s přihlédnutím na velikost zrna 6 μm - řadí se do třídy Grafit 2 (5 - 10 μm), jsme zjistili pokles úběru materiálu o 30 % ve srovnání se stejným grafitem při technologii s názvem impulzu 113600. Pokles úběru materiálu a tím i celkové doby obrábění dutiny je především způsoben rozdílným nastavením OFF - TIME a ON - TIME parametrů softwarem stroje. Jedná se o dobu vyplachování dutiny mezi jednotlivými pulzy - OFF - TIME a o dobu při

kteřé dochází k úběru materiálu vzniklé jiskrou - ON - TIME. U technologie s názvem impulsu 113600 je OFF - TIME  $P = 37 \mu s$  a ON - TIME parametr  $T = 56 \mu s$ . U technologie s názvem impulsu 213800 je OFF - TIME  $P = 56 \mu s$  a ON - TIME parametr  $T = 116 \mu s$

(viz. Příloha B, C - Nastavení technologie stroje pro standardní úběr třísky). Opotřebenění grafitové elektrody HK - 20 je u tohoto technologického nastavení pouze 0,7 mm. Je to způsobeno delším vyplachování dutiny a méně agresivním úběrem materiálu, které výrazně způsobuje prodlužování obráběcího procesu.

Z naměřených hodnot experimentu B jsme u obou grafitových materiálů pomocí nastavení technologie obrábění dle technické příručky výrobce grafitu POCO Graphite, Inc. dosáhli výrazného snížení celkové doby obrábění dutiny. Došlo také k agresivnějšímu úběru materiálu s téměř identickým opotřebením elektrody, jako u technologie zvolené softwarem stroje. Těchto parametrů jsme dosáhli pouhým přenastavením technologie zvolené softwarem stroje. OFF - TIME parametr  $P$  jsme snížili na pouhé  $2 \mu s$ , čímž jsem docílili vyšší produktivity práce na úkor vyšší drsnosti povrchu, která není u hrubovacího procesu důležitým faktorem. Zvýšením proudu výboje, z  $I = 21 A$  na  $I = 29 A$ , jsme docílili výrazně většího úběru materiálu za jednotku času. U grafitu HK - 20 jsme dosáhli hodnoty opotřebenění 0,4 mm, což je dokonce o 0,05 mm nižší opotřebenění elektrody, než u technologie zvolené automaticky softwarem stroje. U elektrody z grafitu HK - 20 je však opotřebenění stále vysoké. Životnost elektrody by se tedy snižovala a s ní i zachování přesnosti přenosu detailů při obrábění. Celkový čas obrábění dutiny se nám podařilo snížit z původních 81 min, při nastavení technologie softwarem stroje, na 55 min. U grafitu EDM - 1 jsme dosáhli shodného opotřebenění elektrody jako u experimentu A, ale s mnohem větším úběrem materiálu. Opotřebenění elektrody z grafitu EDM - 1 je 0,22 mm. Ve srovnání s grafitem HK - 20 je téměř poloviční, což je velká výhoda tohoto grafitu. Tato grafitová elektroda nám zachovává přesnější detail přeneseného tvaru a lze využívat pro více dutin stejného tvaru bez jejího obnovení. Celkový čas se nám podařilo snížit z původních 95,4 min, při nastavení technologie softwarem stroje, na 67 min. Nástrojová elektroda z grafitu HK - 20 obrobí požadovanou dutinu o 12 min rychleji než při použití nástrojové elektrody z grafitu EDM-1, což je úspora 18 % z celkového času obrábění.

Cena materiálu grafitu EDM - 1 je o 30 % vyšší jak cena grafitového materiálu HK - 20. U elektroerozivního procesu je však důležitější celková doba obráběcího procesu a opotřebenění elektrody. Ve výsledku se tyto faktory na ceně promítnou daleko více, jak cena materiálu elektrody. Nástrojová elektroda z grafitu HK - 20 dosahuje větších úběrů materiálu

za jednotku času, ale má výrazně vyšší opotřebení. Proto bych doporučil pro hrubovací operace typu žeber a jemných tvarů použít elektrodu vyrobenou z grafitového materiálu EDM - 1. Při vhodně nastavených parametrech elektrického výboje dosahuje tato elektroda z grafitového materiálu od firmy POCO Graphite, Inc. podobných úběrů materiálů, při polovičním opotřebení elektrody.



## **7 Závěr**

Při tvorbě bakalářské práce jsme v obráběcím procesu používali rozdílný grafitový materiál nástrojových elektrod. Z výsledků obrábění jsme zjistili odlišné vlastnosti obou nástrojových elektrod. Vhodně nastavenými parametry obráběcího stroje jsme našli optimální parametry pro hrubovací proces obou elektrod. Došli jsme k závěru, že oba zkoušené grafitové materiály používané k výrobě elektrod nejsou při elektroerozivním obrábění zaměnitelné. Nástrojová elektroda vyrobená z grafitu EDM - 1 od výrobce POCO Graphite, Inc. dosahovala při obrábění dutiny menších úběrů materiálů s nižším opotřebením elektrody. Obrábění nástrojovou elektrodou z grafitu HK - 20 od výrobce TOKAI CARBON CO., LTD. docházelo k agresivnějšímu úběru materiálu, ale s výrazně vyšším opotřebením elektrody. Opotřebením elektrody má velký vliv na schopnost elektrody vytvářet a přenášet detaily. Dále pak výrazně ovlivňuje životnost elektrody, kterou lze při minimálním opotřebením dále používat. Materiál, ze kterého je elektroda vyrobená je jen malou částí celkových nákladů na elektroerozivní obráběcí proces. Ve většině případech jsou materiálové náklady na elektrodu vůči celkovým nákladům zanedbatelné. Nejvíce závislým faktorem na materiál elektrody je celková doba jeho obrábění, doba elektroerozivního procesu, náklady na obsluhu stroje a opotřebením elektrody. Z tohoto důvodu je nutné znát vlastnosti a výkonnostní charakteristiky materiálu elektrody a jejich vliv na materiál obrobku při obrábění. Když budeme mít znalosti těchto údajů, jsme schopni spočítat náklady ve spojení s výkonnostními parametry a určit skutečné náklady na obráběcí proces. Pro hrubovací proces EDM procesu typu žeber a jemných tvarů jsme zvolili jako vhodnější nástrojový materiál grafit EDM - 1. Přestože se dnes málokdo setká s výrobkem, u kterého by při jeho výrobě nebyla technologie elektroerozivního obrábění použita, je povědomí veřejnosti o této technologii poměrně malé.

## **8 Seznam použité literatury**

- [1] ŘASA, Jaroslav - POKORNÝ, Přemysl - GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 2.díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. Praha: Scientia, 2005. 225s. ISBN 80-7183-336-3.
  
- [2] *MM Průmyslové spektrum* [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
  
- [3] *Strojnílyceum* [online]. Poslední aktualizace 15.3.2010, [cit.15-3-.2010].  
URL: <<http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>>.
  
- [4] FOREZ [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <<http://forez.cz/page.php?a=historie&i=historie&l=cz>>.
  
- [5] *MM Průmyslové spektrum* [online]. Poslední aktualizace 20.4.2010, [cit.20-4-.2010].  
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>>.
  
- [6] *MM Průmyslové spektrum* [online]. Poslední aktualizace 29.3.2010, [cit.29-3-.2010].  
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>>.
  
- [7] *Mineralogy Database - Mineral Collecting, Localities, Mineral Photos and Data* [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <<http://www.mindat.org/photo-79208.html>>.
  
- [8] *Atiur* [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <[http://www.atiur.cz/grafit\\_technol.htm](http://www.atiur.cz/grafit_technol.htm)>.
  
- [9] *Dalibor Velebil - geologie, mineralogie, historie dolování* [online]. Poslední aktualizace 7.4.2010, [cit.7-4-.2010].  
URL: <<http://www.velebil.net/mineraly/grafit>>.

- [10] *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Grafit>>.
- [11] *AGIE - CHARMILLES*:: [online]. Poslední aktualizace 27.4.2010, [cit.27-4-.2010].  
URL: <<http://www.agiecharmilles.cz/agieedm.html#impact23>>.
- [12] *Tedok, spol s r.o. - EDM Grafit a nástroje* [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <<http://www.tedok.cz/tabulka-spravne-volby>>.
- [13] *:: Sinograf :: New technologies and materials :: Graphite :: Grapite sealing materials :: Graphite* [online]. Poslední aktualizace 9.5.2010, [cit.9-5-.2010].  
URL: <<http://www.sinograf.com/elektrody.html>>.
- [14] *Anlagenhandbuch C Teil 1 - AGIE Agiecut Schneiderodiersysteme, Agietron Senkerodiersysteme*. Losone - Schweiz: AGIE. 2005.
- [15] *EDM Technical Manual - Poco Graphite, Inc.* Decatur, TX 76234: POCO GRAPHITE, Inc. 2000.

## **9 Seznam příloh**

**Příloha A** - Materiálové listy materiálu ČSN 41 9552 - list 1/2

**Příloha B** - Nastavení technologie stroje pro standardní úběr třísky (Grafit 1) - list 1/1

**Příloha C** - Nastavení technologie stroje pro standardní úběr třísky (Grafit 2) - list 1/1

**Příloha D** - Nastavení technologie stroje pro standardní úběr třísky (Grafit 3) list 1/1

**Příloha E** - Nastavení podrozměru elektrody pro zvolenou technologii (Grafit 1) - list 1/1

**Příloha F** - Nastavení podrozměru elektrody pro zvolenou technologii (Grafit 2, 3) - list 1/1

**Příloha G** - Výkres žebra elektrody - list 1/1

**Příloha H** - Drsnost VDI - list 1/1

### **Poděkování:**

Poděkování patří firmě Forez s.r.o. za poskytnutí pracovních technologií, materiálů a důležitých informací o daném problému s jejichž pomocí bakalářská práce vznikla. Poděkovat bych chtěl především vedoucímu technologie firmy Forez s.r.o. panu Janu Otevřelovi.

Dále je poděkování věnováno panu Doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za vedení a rady při tvorbě bakalářské práce.

*Tomáš Filip*

Tomáš Filip